



Vattenbalansberäkningar som metod för bevattningsplanering

Efterhandsvalidering i svenskabevattningsförsök med olika bevattningsstrategier i vall

Soil-water balance for irrigation scheduling
-Method validation in Swedish irrigation trials in ley

Carl Andås



Självständigt arbete • 30 hp
Sveriges lantbruksuniversitet, SLU
Institutionen för mark och miljö
Agronom mark/växt
Serienummer• 2023:03
Uppsala 2023

Publicering och arkivering

Godkända självständiga arbeten (examensarbeten) vid SLU publiceras elektroniskt. Som student äger du upphovsrätten till ditt arbete och behöver godkänna publiceringen. Om du kryssar i **JA**, så kommer fulltexten (pdf-filen) och metadata bli synliga och sökbara på internet. Om du kryssar i **NEJ**, kommer endast metadata och sammanfattning bli synliga och sökbara. Även om du inte publicerar fulltexten kommer den arkiveras digitalt. Om fler än en person har skrivit arbetet gäller krysset för samtliga författare. Du hittar en länk till SLU:s publiceringsavtal på den här sidan:

- <https://libanswers.slu.se/sv/faq/228316>.

JA, jag/vi ger härmed min/vår tillåtelse till att föreliggande arbete publiceras enligt SLU:s avtal om överlåtelse av rätt att publicera verk.

NEJ, jag/vi ger inte min/vår tillåtelse att publicera fulltexten av föreliggande arbete. Arbetet laddas dock upp för arkivering och metadata och sammanfattning blir synliga och sökbara.

Vattenbalansberäkningar som metod för bevattningsplanering. Efterhandsvalidering i svenska bevattningsförsök med olika bevattningsstrategier i vall

Carl Andås

Handledare: Abraham Joel, Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för mark och miljö

Examinator: Jennie Barron, Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för mark och miljö

Omfattning: 30 hp

Nivå och fördjupning: Avancerad nivå, A2E

Kurstitel: Självständigt arbete i markvetenskap

Kurskod: EX0881

Program/utbildning: Agronom mark/växt

Kursansvarig inst.: Institutionen för mark och miljö

Utgivningsort: Uppsala

Utgivningsår: 2023

Omslagsbild: Ålands Hushållningssällskap

Upphovsrätt: Alla bilder används med upphovspersonens tillstånd.

Nyckelord: bevattning, Penman-Monteith, markvattenhaltsmätningar
evapotranspiration

Sveriges lantbruksuniversitet

Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap

Institutionen för mark och miljö

Sammanfattning

Bevattningsplanering för med sig många effekter som vore önskvärda i dagens svenska lantbruk, som präglas av ökade produktionsrisk till följd av höga produktionskostnader men samtidigt ökade avräkningspriser. Efterfrågan på bevattningskompetens och effektiv bevattningsplanering för att kunna hushålla med begränsade vattenresurser kan förväntas öka i vår tid.

Det föreliggande arbetet syftar till att testa lämpligheten hos den metod för bevattningsplanering med vattenbalansberäkningar som rekommenderas av FN i FAO Irrigation and Drainage Paper no 56 för svenska förhållanden. Vattenbalansberäkningarna har testats på data från bevattningsförsöken L1-267, L1-268 och L1-269 som var utlagda på Gotland och Öland under åren 2020 respektive 2021, i vilka tre olika bevattningsstrategier testats i vall med två olika vallblandningar. Vattenbalansberäkningarna är baserade på Penman-Monteith-ekvationen för beräkning av potentiell evapotranspiration och har testats mot mätningar av markens volymetriska vattenhalt som utförts med en Delta-T Profile Probe PR2 SDI-12. Datan har analyserats utefter förändringar i markvattenförråd mellan mättillfällena med ungefärligen veckovisa intervall. Totalt har sex försöksårs data analyserats. Resultaten visar god överensstämmelse mellan beräknad och uppmätt förändring i markvattenförråd vid god tillgång på indata. Då lokala väderdata finns tillgängliga och markens förråd av växttillgängligt vatten är känt överensstämmer beräkningarna med mätningarna till 73–93 %. Beräkningarna avviker då från mätningarna i genomsnitt med 6–8 mm från ett mättillfälle till ett annat tenderar att överskatta snarare än underskatta förändringen i markvattenförråd, men trenden var för svag för att dra några slutsatser och sett till volymer syntes ingen trend åt något håll. Vid sämre tillgång till väderdata och kunskap om marken överensstämde beräkningarna till 48–70 % med mätningarna, och avvikelsen steg till 14–16 mm. Beräkningarnas överensstämmelse med mätningarna är inte beroende av bevattningsstrategi, däremot har försöksår och försöksplats större inverkan på resultaten. Resultaten pekar på att bevattningsplanering med hjälp av de vattenbalansberäkningar som testats i arbetet kan rekommenderas vid god tillgång till lokala väderdata. Cirka 5 % av vattenhaltsmätningarna undantogs analys då mätsvaren var uppenbart felaktiga eller ofullständiga, utan att något mönster kunde anas bakom mätfelen. Att bara använda få mätningar av markens vattenhalt som grund för bevattningsplanering avråds därför ifrån. Däremot kan mätningar utgöra ett viktigt komplement till vattenbalansberäkningar vid avsaknad av ex. lokala nederbördsdata då vattenbalansberäkningar fungerar sämre.

Nyckelord: bevattning, Penman-Monteith, markvattenhaltsmätningar evapotranspiration

Abstract

Irrigation comprehends many effects that appear desirable in the Swedish crop production of today, which has seen an increase in both production costs and settlement prices. The need for irrigation planning and management know-how might be assumed to increase, in order to efficiently manage limited water resources.

The aim of the study at hand was to test the suitability of calculations of soil water balance as a method for irrigation planning in Sweden. The soil water balance was calculated accordingly to the recommendations of the UN in FAO Irrigation and Drainage Paper no 56. The calculated soil water balance was tested on data from three irrigation field trials, L1-267, L1-268 and L1-269, which were executed during 2020 and 2021. The field trials tested three different irrigation strategies on two different seed mixtures of ley, in two sites in the southeast of Sweden. The calculated soil water balance is based on the Penman-Monteith equation for calculation of reference evapotranspiration and has been compared with measurements of soil volumetric water content, performed with a Delta-T Profile Probe PR2 SDI-12. The soil water balance and measurement data have been handled by calculating changes in soil water content on weekly basis, rather than absolute values of soil water content. In total, data from six seasons of field trials have been analysed. The results show a high conformity between the calculated and measured changes in soil water content when conditions are good in terms of access to local weather data and correct information about the field capacity of the soil. With correct input data, a conformity between calculated and measure changes in soil water content of 73-93 % where achieved. In those cases, the predictions of the calculations deviated from the those of the measurements with 6-8 mm of water, when predicting a change in soil water content from one week to the next. The calculations leaned towards overestimating rather than underestimating the changes in soil water content, but the trend was too subtle to draw any conclusions and absent went comparing volumes rather than occasions. With increasing distance to a weather station and less accurate predictions of field capacity, the conformity of the calculations and measurements varied between 48-70 % and the average deviation reached 14-16 mm of water. The accuracy of the soil water balance calculations did not differ clearly between irrigation strategies, but rather between year and site. The results suggest that the soil water balance method may be recommended as a tool for irrigation planning, when irrigated fields are near a weather station. Around 5 % of the measurements of soil water contents were excluded from analysis due to either incomplete or implausible erratic results. Measurements are important tools for complementing lack of local weather data but may not be recommendable as sole method for irrigation planning if not carried out extensively.

Keywords: Penman-Monteith, soil water potential, evapotranspiration, irrigation strategies

Populärvetenskaplig sammanfattning

Bevattningsmetoder kan höja, säkra och jämna avkastningen mellan år – men när bevattna, och hur mycket? Det finns många markvattenhaltsmätare och sensorer på marknaden, i det här arbetet testades en äldre metod för att i stället beräkna när bevattningsmetoder bör ske och hur mycket vatten som fattas i marken.

Beräkningarna som använts i arbetet, s.k. vattenbalansberäkningar, går i korthet ut på att skaffa sig en uppfattning av jordens vattenhållande förmåga, anta att markens vattenförråd är fyllt i början av våren och sedan följa hur mycket vatten som tillförs genom regn och bevattningsmetoder respektive försvinner genom avdunstning och grödans transpiration. Avdunstning och transpiration kan slås samman, kallas då evapotranspiration och beräknas utifrån väderdata som registreras av en väderstation. In- och utflöden läggs till och dras ifrån markens beräknade vattenförråd, och så när underskottet av vatten nått den gräns då grödan börjar drabbas av torkstress sätts en bevattningsmetod in.

I arbetet testades beräkningsmetoden mot mätningar av markens vattenhalt som gjorts i tre bevattningsförsök i vall på Gotland och Öland 2020 respektive 2021. I försöken testades tre olika bevattningsstrategier, och ett av målen med arbetet var att se om beräkningarna fungerade bättre eller sämre med någon särskild bevattningsstrategi. Totalt analyserades sex försöksår.

Resultaten visade att beräkningsmetoden fungerade bra, men att det inte berodde på vilken bevattningsstrategi som använts utan snarare hur året varit och hur långt fältet låg från en väderstation. Var väderstationen i närheten och om jordens i fråga vattenhållande förmåga hade undersökts i labb så stämde beräkningarna med mätningarna till mellan 73–93 %, och från en vecka till nästa avvek den beräknade förändringen i markvattenförråd från mätningarna med mellan 6–8 mm (eller 60–80 m³ ha⁻¹). Beräkningarna tenderade inte att vara sig överskatta eller underskatta förändringen av markvattenförrådet sett till totala volymer, men överskattade något oftare förändringen än tvärtom. Under ett av försöksåren på Öland låg försöket längre bort från väderstationen än de andra åren, det året uppskattades endast markens vattenförråd i stället för att analyseras på labb och dessutom togs fyra skördar – de övriga försöksåren togs tre. Under det försöksåret blev överensstämmelsen 48–70 % och avvikelserna mellan mätilfällen steg till 14–16 mm.

Slutsatserna som dragits är att vattenbalansberäkningar kan rekommenderas för bevattningsplanering om lokala väderdata finns tillgängliga, men att mätningar kan utgöra ett bra komplement till beräkningarna när t.ex. lokala regnskurar faller vid gården men inte vid väderstationen. Vidare bör metoden för årsanpassning av s.k. grödkoefficient-kurvor standardiseras för att göra beräkningarna lättare att använda på ett enhetligt sätt i större skala. Slutligen avråds läsare från att basera sin bevattningsplanering på ett fåtal mätningar av markens vattenhalt, eftersom vattenhaltsmätningarna i arbetet ibland gav mycket olika mätsvar sinsemellan och att det var svårt att förstå varför eller när sådana fel uppstår.

Innehållsförteckning

Tabellförteckning	9
Figurförteckning.....	10
Förkortningar.....	11
1. Inledning	12
1.1 Syfte	14
2. Bakgrund	15
2.1 Markfysik.....	16
2.2 Vattenbalanser och evapotranspiration	20
2.2.1 Potentiell evapotranspiration	22
2.2.2 ETc och grödkoefficienten	23
2.2.3 ETc adj.....	24
2.2.4 Mätningar av markvatteninnehåll.....	25
2.3 Bevattningsförsöken L1-267, -268 och -269	25
3. Metod.....	27
3.1 Vattenbalansberäkningar	27
3.2 Mätningar av markvatteninnehåll	29
3.3 Jämförelser av mätdata och vattenbalans	30
4. Resultat	33
4.1 Nederbörd och ET0 2020-2021	33
4.1.1 Gotland	34
4.1.2 Öland	35
4.2 Markvattenförrådets förändringar på Gotland.....	36
4.2.1 L1-267 2020.....	38
4.2.2 L1-268 2021.....	39
4.2.3 L1-269 2021.....	40
4.3 Markvattenförrådets förändringar på Öland	41
4.3.1 L1-267 2020.....	43
4.3.2 L1-268 2021.....	44
4.3.3 L1-269 2021.....	45
5. Diskussion	46

5.1	Vattenbalansberäkningar	46
5.2	Mätningar av markvatteninnehåll	47
5.3	Jämförelser av mätdata och vattenbalans	48
6.	Slutsatser och rekommendationer	50
	Referenser.....	51
	Bilaga 1.....	55
	Bilaga 2.....	56

Tabellförteckning

Tabell 1 In- och utflöden av vatten i en markprofil	21
Tabell 2 Bevattnings- och skördeparametrar för försöken L1-267 (2020), L1-268 (2021) och L1-269 (2021)	26
Tabell 3 Försöksplatsernas jordars markfysikaliska parametrar	28
Tabell 4 Belysande datum och markvattentillstånd från de olika försöksåren enligt vattenbalansberäkningarna	33
Tabell 5 Korrelationskoefficienter (r) för försöken på Gotland	36
Tabell 6 Mean biased error baserat på positiva tal för försöken på Gotland (mm)	37
Tabell 7 Utsträckningen i vilken markvattenförrådets förändring överskattats av beräkningarna i de gotländska försöken	37
Tabell 8 Korrelationskoefficienter (r) för försöken på Öland	41
Tabell 9 Mean biased error baserat på positiva tal för försöken på Öland (mm)	42
Tabell 10 Utsträckningen i vilken markvattenförrådets förändring överskattats av beräkningarna i de öländska försöken	42

Figurförteckning

Figur 1 Nederbörd (P), potentiell evapotranspiration (ET_0) och nederbördsunderskott ($P-ET_0$) på Torslunda 2017–2021	13
Figur 2 Nederbörd (P), potentiell evapotranspiration (ET_0) och nederbördsunderskott ($P-ET_0$) på Hallfreda 2017–2021	13
Figur 3 Schematisk bild på kapillär med fullständig vätning (Messing 2013).....	18
Figur 4 Bindningskaraktäristika (alt. pF-diagram) för två jordarter (Andersson 1972)	19
Figur 5 Växttillgängligt vatten på olika jordar vid fältkapacitet (Johansson & Linnér 1977)	21
Figur 6 Grödkoefficientens (K_c) faser från vårens början till första skörd, Gotland 2020	24
Figur 7 Handenhet vid mätning.....	30
Figur 8 Mättrör och del av installationsutrustning	30
Figur 9 Nederbörd och evapotranspiration på Hallfreda under odlingssäsongerna 2020 och 2021	34
Figur 10 Nederbörd och evapotranspiration på Torslunda under odlingssäsongerna 2020 och 2021	35
Figur 11 Uppmätt och beräknad veckovis förändring i markvatteninnehåll på Hallfreda 2020	38
Figur 12 Uppmätt och beräknad veckovis förändring i markvatteninnehåll på Hallfreda 2021 (L1-268)	39
Figur 13 Uppmätt och beräknad veckovis förändring i markvatteninnehåll på Hallfreda 2021 (L1-269)	40
Figur 14 Uppmätt och beräknad veckovis förändring i markvatteninnehåll på Torslunda 2020	43
Figur 15 Uppmätt och beräknad veckovis förändring i markvatteninnehåll på Torslunda 2021 (L1-268)	44
Figur 16 Uppmätt och beräknad veckovis förändring i markvatteninnehåll på Torslunda 2021 (L1-269)	45

Förkortningar

ET	Evapotranspiration
ET ₀	Potentiell evapotranspiration
ET _c	Grödanpassad evapotranspiration
ET _{c adj}	Torkstressanpassad evapotranspiration
K _s	Torkstressfaktor
mvp	Meter vattenpelare
p	Gränsfaktor för torkstress
pF	Negativ tiologaritm av tryckhöjd
RAW	Direkt tillgängligt vatten
TAW	Totalt tillgängligt vatten

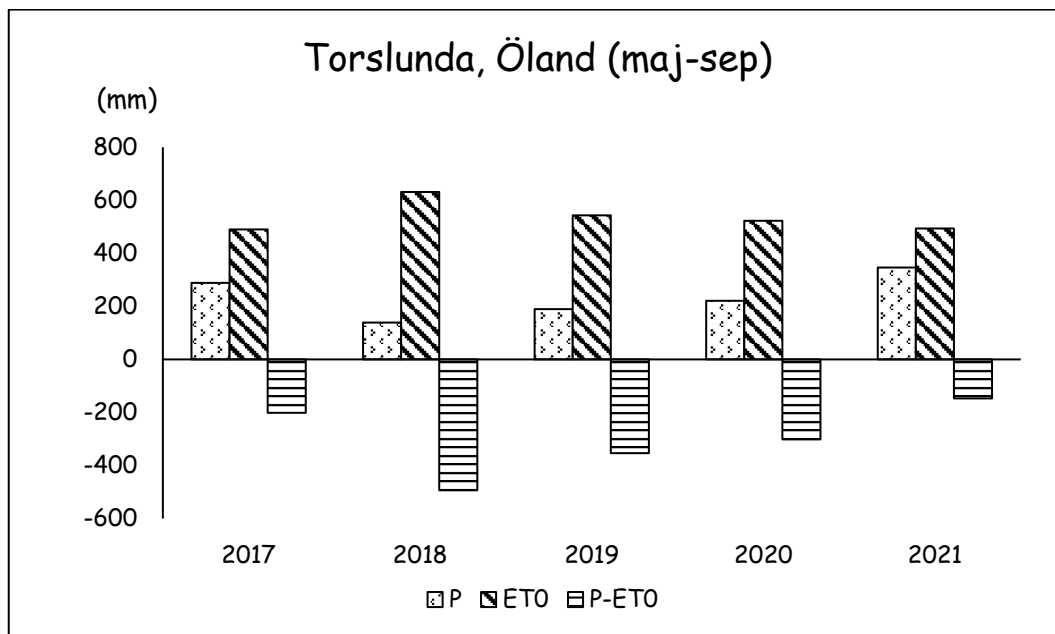
1. Inledning

2018 har blivit ett mycket uppmärksammat år p.g.a. torkan som då drabbade bl.a. Sverige. Nederbördsunderskott under sommarhalvåret är snarare regel än undantag i stora delar av landet, vilket kan påverka skördeutbytet negativt (Johansson & Linnér 1977; Weidow 2000; Fogelfors 2015). Klimatet är under förändring på global skala (Pörtner et al. 2022), för svenskt vidkommande har det beräknats kunna påverka våra åkergrödors vattenförsörjning negativt, trots att nederbörden på årsbasis inte förutspås minska i Sverige som helhet (Grusson et al. 2021).

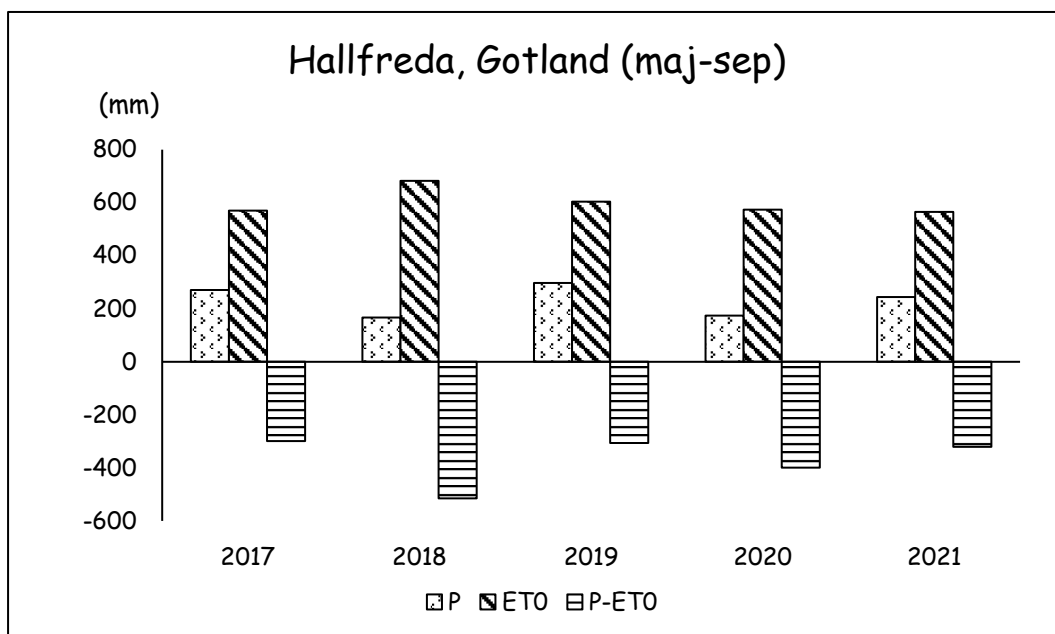
Det svenska lantbruket har under det senaste året dessutom sett drastiskt ökade kostnader för många viktiga resurser och insatsmedel, där särskilt energi och mineralkväve varit mycket omtalade (Holmberg 2022; LRF 2022; Nilsson 2022). Dock har även avräkningspriset på många skördeprodukter stigit, vilket enligt rådgivare och säljare delvis kan motivera fortsatt höga avkastningsmål (Holmberg 2022; Karlsson et al. 2022; Nilsson 2022). Ökar värdet av en gröda till följd av stigande avräkningspriser och produktionskostnader torde riskminimering vara av ökat intresse för odlarna. Bevattning har i äldre och nutida forskning och försök bedömts vara skördehöjande, skördeutjämnande och bidra med bättre näringsutnyttjande för grödan (Försöksavdelningen 1969; Håkansson et al. 1970, 1971, 1972, 1973; Berglund et al. 1982, 1983, 1984; Linnér et al. 1985, 1987, 1988, 1989, 1990; Thor 2020; Andås & Nygårds 2021), effekter som vore mycket eftersträvansvärda i dagens situation. Idag bedrivs färre fältförsök kring bevattning i Sverige än under 1900-talets slut. Samtidigt är vatten en begränsad resurs som Sverige förbundit sig till att effektivisera sin användning av inom ramen för Agenda 2030 (Regeringskansliet 2016). Ökade kunskaper och färdigheter inom effektiv bevattningsplanering förefaller då välbehövliga, vilket motiverar det föreliggande arbetet.

Fältförsöken L1-267 från 2020, L1-268 och L1-269 från 2021 är exempel på nutida svensk bevattnings-forskning. I de tre försöksserierna testades tre olika bevattningsstrategier i vall mot en obevattnad kontroll, i två olika vallblandningar på Gotland och Öland. I figurerna 1 och 2 presenteras försöksplatsernas nederbörd, evapotranspiration och nederbördsunderskott under de senaste fem årens odlingsårer. I försöken har vall tillskottsbevattnats och analyserats för avkastning, botanisk sammansättning och foderegenskaper. I det föreliggande arbetet testas en metod för bevattningsplanering gentemot uppmätta värden på

markens vatteninnehåll från de tre försöksserierna L1-267, L1-268 och L1-269. Metoden som testas är baserad på den av Förenta nationernas livsmedels- och jordbruksorganisation (FAO) rekommenderade Penman-Monteith-ekvationen.



Figur 1 Nederbörd (P), potentiell evapotranspiration (ET₀) och nederbördsunderskott (P-ET₀) på Torslunda 2017–2021



Figur 2 Nederbörd (P), potentiell evapotranspiration (ET₀) och nederbördsunderskott (P-ET₀) på Hallfreda 2017–2021

1.1 Syfte

Bevattningsförsöken L1-267, -268 och -269 är utförda på Öland och Gotland under åren 2020 (L1-267) och 2021 (L1-268 och L1-269), totalt finns data från sex försöksår. I samtliga försök jämfördes tre bevattningsstrategier med ett obevattnat led. Parallellt gjordes mätningar av markens vatteninnehåll i intervaller av ca en vecka. Mätningarna genomfördes på fyra djup ned till 35 cm med en Delta T Profile Probe PR2 SDI-12.

Arbetets mål är att jämföra vattenbalansberäkningar baserade på Penman-Monteith-ekvationen med mätningar av markens vatteninnehåll från de ovannämnda försöken. Syftet med jämförelsen är att testa vattenbalansberäkningarnas överensstämmelse med mätningarna, och utröna metodens lämplighet som verktyg för bevattningsplanering i Sverige. Arbetets mål ska uppnås genom upprättande av vattenbalansberäkningar för samtliga försöksår och jämförelser med mätningar av markens vatteninnehåll över tid. Resultaten ska jämföras både grafiskt och matematiskt. Arbetet är också tänkt att utgöra en introduktion till bevattningsplanering med vattenbalansberäkningar för rådgivare inom växtodling på åkermark, i en tid då efterfrågan på bevattningskompetens kan tänkas öka. Därför kommer viss tonvikt att läggas vid teorin bakom markfysikaliska processer och termer som ofta nämns i bevattningssammanhang.

2. Bakgrund

I detta avsnitt görs en ansats att förklara hur markens volymetriska vattenhalt hänger samman med vattenpotential och jordart, med grundläggande markfysik som utgångspunkt. Därefter beskrivs hur en bevattningsplanering kan genomföras med hjälp av vattenbalansberäkningar, samt hur en sådan anpassas för en nordisk vallgröda som riskerar drabbas av torka. Avslutningsvis diskuteras mätning av markens vatteninnehåll samt försöken varifrån data hämtats till det föreliggande arbetet.

I svensk agrar kurslitteratur förekom avsnitt om bevattning under 1900-talets slut och vid millennieskiftet (Johansson & Linnér 1977; Weidow 2000), men i senare verk beskrivs bevattningens teknik och planering mer kortfattat eller inte alls (Fogelfors 2015; Neuman & Sörkvist 2020). Då bevattningsplanering tas upp rekommenderas tekniker såsom:

1. Bevattning efter evapotranspiration (beräknad eller uppmätt med avdunstningsmätare)
2. Bevattning efter mätning av markens volymetriska vatteninnehåll med tensiometer eller annan fuktmätarutrustning
3. Fast bevattningsschema där bevattning sker med ett på förhand bestämt intervall.

I moderna svenska bevattningsförsök används det förstnämnda, en vattenbalans sätts upp baserat på uppskattat vattenmagasin och beräkningar av evapotranspiration görs dagligen med den av FAO rekommenderade Penman-Monteith-ekvationen (utförligt beskriven i avsnitt 3) (Joel et al. 2020, 2021; Larsson 2020). Vattenbalansberäkningarna kompletteras med löpande mätningar av markens vattenförråd.

Penman-Monteith-ekvationen har använts länge för beräkningar av potentiell evapotranspiration, och vattenbalansberäkningar baserade på evapotranspiration har fördelen av att kunna användas utan utförlig kännedom om jordens hydrauliska egenskaper (Allen et al. 1998:1–15). I vattenbalansberäkningar baserade på evapotranspiration betraktas marken, från markytan ned till största rotdjup, som en enda enhet eller pool och endast vattenflöden in och ut ur poolen beaktas. Fallet är det motsatta vid mer avancerad modellering av marken och dess vattenflöden, vilket exempelvis kan göras med hjälp av van Genuchten och Richards ekvationer (Hillel 1980). I sådan modellering kan vattenflöden mellan djupskikt i jorden beskrivas

och en mer detaljerad bild över vattentillståndet i marken kan skapas än om marken betraktas som en enda enhet. Dock kräver modellering med van Genuchten's och Richards ekvationer ingående kunskap om den specifika jordens hydrauliska konduktivitet vid olika vattenhalter, struktur o.s.v., och skulle således kunna betraktas som mindre "fältmässig" än vattenbalansberäkningar baserade på evapotranspiration. Penman-Monteith-ekvationen kräver dock väderdata utöver vad många enkla väderstationer mäter och har sagts underskatta evapotranspirationen (Allen et al. 1998:27), samt vara inexact under de perioder då grödan som studerats haft låg marktäckningsgrad (Bao et al. 2021). Likväl rekommenderas rådgivare och lantbrukare använda sig av vattenbalansberäkningar med Penman-Monteith-ekvationen för vattenbalansberäkningar i sin bevattningsplanering av FAO (Allen et al. 1998) och forskare vid SLU (Linnér 2009; Joel 2018).

2.1 Markfysik

Mark kan sägas bestå av tre faser: fast, flytande och gas. Den fasta fasen utgörs av mineral (enkelkorniga eller aggregerade) och organiskt material, den flytande av vatten och gasfasen av luft. Den flytande fasens volym (V_W) och gasfasens volym (V_A) utgör inte en fast andel av markens totala volym (V_T) utan varierar under en växtsäsong utefter tillgången på vatten. De varierar även över längre tidsperioder när markpackning eller frost kompakterar eller expanderar hålrummet i jorden. Den sammanlagda volymen av hålrum som andel av jordens totala volym utgör jordens porositet (ϕ) och beräknas enligt (Hillel 1980; Messing 2013):

$$\phi = \frac{V_W + V_A}{V_T} \quad (1)$$

Där ϕ är jordens porositet (dimensionslös), V_W den flytande fasens volym (m^3), V_A gasfasens volym (m^3) och V_T jordens totala volym (m^3). En jords hålrum, mellan markpartiklar (enkla korn och aggregat) samt mindre utrymmen inuti aggregat bildar tillsammans ett porsystem. Till markpartiklarnas ytor binds små mängder vatten genom adhesionskrafter, kallat adsorptivt bundet vatten. Kapillärt vatten hålls i stället kvar i jorden av kapillärt tryck som luften skapar i små porer samt av ytspänning, och utgör vanligen en mycket större andel av den totala mängden markvattnet än det adsorptivt bundna vattnet. Det kapillärt bundna vattnet står också för den mesta rörelsen av vatten i jorden. Drivkrafterna bakom vattenrörelser i marken är gravitationspotential (alt. lägespotential) och tryckpotential. Gravitationspotential (z) uppstår genom relativ skillnad i höjd mellan två platser

och definieras enligt ekvation (2) som ett förhållande mellan vattnets massa, gravitationskonstanten och skillnaden i höjd (Messing 2013).

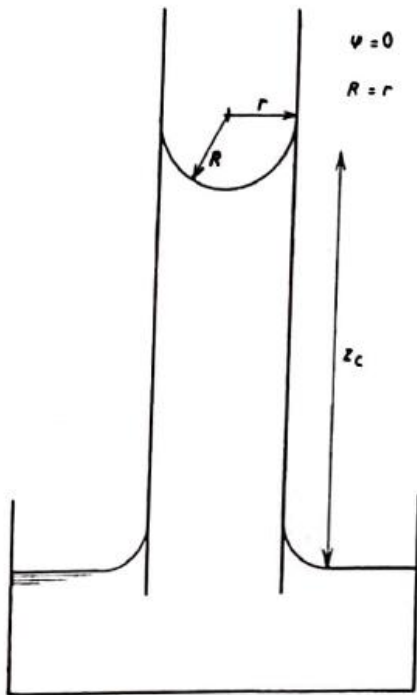
$$z = M_W * g * \Delta h \quad (2)$$

Där z är gravitationspotential (m om uttryckt per enhet vatten), M_W vattnets massa (kg), g gravitationskonstanten (m s^{-2}) och h höjden från grundvattenytan (m). Tryckpotential (ψ) är också ett relativt mått och beskrivs ibland som skillnad i vattenhalt mellan två platser, men härrör egentligen från kapilläritet snarare än vattenhalt. Vatten rör sig från hög tryckpotential (hög vattenhalt) till låg tryckpotential (låg vattenhalt) (Hillel 1980). Tryckpotential mäts empiriskt med exempelvis tensiometer (Freire et al. 2018), vid grundvattenytan råder atmosfärstryck och där är tryckpotentialen 0, vid omättade förhållanden är tryckpotentialen <0 . Under grundvattenytan är tryckpotentialen >0 och den volymetriska vattenhalten (θ) är lika med porositeten (ϕ). Mätta per enhet vatten kan både gravitationspotential och tryckpotential uttryckas i pascal (Pa), eller vanligast i meter vattenpelare (mvp). Gravitationspotential (z) och tryckpotential (ψ) summerade ger H , totalpotential (alt. hydraulisk potential) enligt (Hillel 1980):

$$H = z + \psi \quad (3)$$

Där H är totalpotential (m), z gravitationspotential (m) och ψ tryckpotential (m). Eckersten et al. (2004) förklarar totalpotential som ”det arbete som krävs för att förflytta en mängd vatten från en referenssituation till ett visst läge och/eller tillstånd”. Vid hydrostatisk jämvikt, d.v.s. när vattnet i en markprofil inte rör sig uppåt eller nedåt är H lika med noll vid varje tänkt djup ovanför grundvattenytan. Med andra ord är summan av gravitations- och tryckpotentialen noll överallt. Detta förhållande används i kapilläritetsekvationen (4) för att sätta ett samband mellan tryckpotential och porstorlek. Kapilläritet är en sugkraft som motverkar gravitationskraften i en kapillär och beräknas enligt:

$$2\pi\sigma\Delta z = \pi r^2 \rho g z_c \Delta z \quad (4)$$



Figur 3 Schematisk bild på kapillär med fullständig vätning (Messing 2013)

de inräknas i täljaren i det högra ledet i (5). Vidare är båda leden i (5) utbytbara med gravitationspotentialen, d.v.s. höjden över den tänkta grundvattenytan. Som tidigare beskrivet är summan av tryckpotential, (som är negativ i den omättade zonen ovan grundvattenytan) och gravitationspotentialen (som är positiv ovanför grundvattenytan) lika med noll. Således kan det vänstra ledet i (5) ersättas med tryckpotentialen om det högra ledet görs negativt. Tillsammans med inkludering av ρ och g i det högra ledets täljare blir ekvationen:

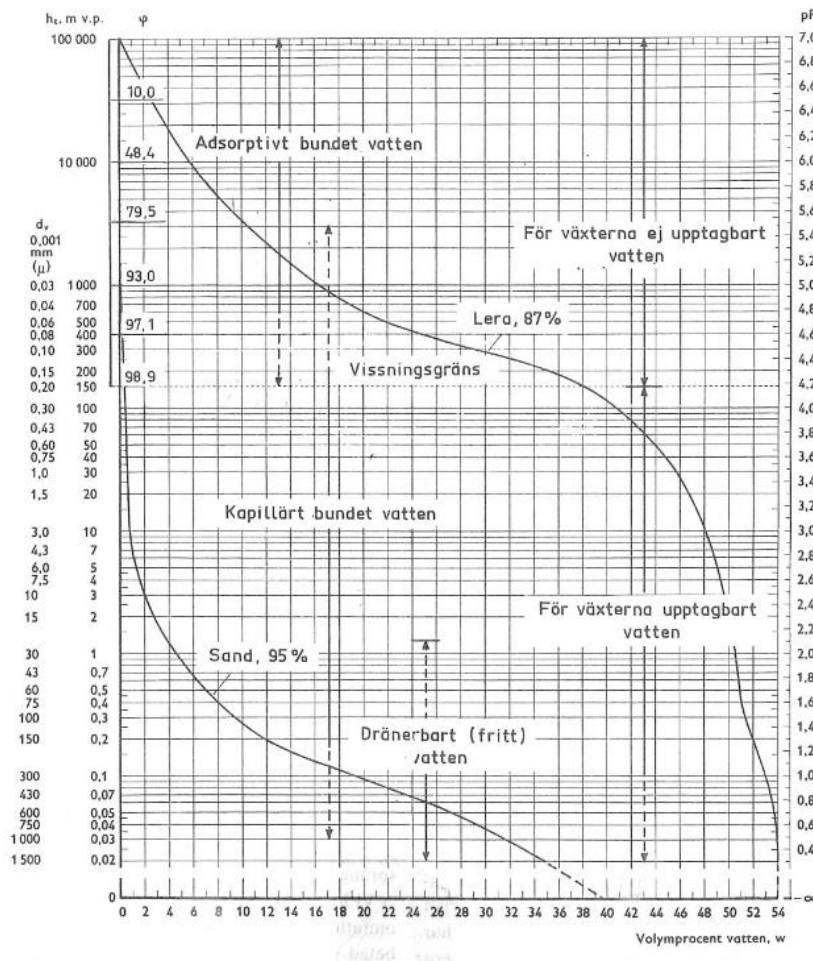
$$\psi = -\frac{0,015}{r} \quad (6)$$

Där ψ är tryckpotential (mvp) och r kapillärens eller porens radie (m). Ekvation (6) förklarar att tryckpotential vid jämvikt hänger samman med porstorlek, förutsatt ovan beskrivna förenklingar. Det förhållandet används vid beskrivningen av hur tryckpotential hänger samman med volymetriskt vatteninnehåll (θ) i en specifik jord, vilket illustreras med en bindnings-karaktäristika, även kallat pF-diagram (se fig. 4).

Där σ är ytspänningen (J m^{-2}), z kapillärens höjd över marken (m), r kapillärens radie (m), ρ vattnets densitet (kg L^{-1}), g gravitationskonstanten (m s^{-2}) och z_c höjden över grundvattenytan (m). I det här arbetet antas att fullständig vätning råder, d.v.s. att avståndet från mitten av den halva cirkel som vattenytan bildar i kapillären till vattenytan själv är detsamma i alla riktningar. Bevättningsvinkeln φ (rad) är då lika med noll och kan ignoreras (Messing 2013). Löses kapillärens höjd över vattenytan ut, och uttrycket förenklas fås (Messing 2013):

$$z_c = \frac{2\sigma}{\rho g r} \quad (5)$$

För parametrar och enheter, se ekvation (4). I och med att vattnets densitet ($\rho \sim 0,999 \text{ g cm}^{-3}$) och gravitationskonstanten ($g \sim 9,807 \text{ m s}^{-2}$) i princip inte varierar kan



Figur 4 Bindningskaraktäristika (alt. pF-diagram) för två jordarter (Andersson 1972)

Av den vänstra y-axeln i figur 4 kan utläsas hur ekvivalentpordiameter (i fig. 4 benämnt d_e) hänger samman med en analog till gravitationspotential, nämligen tryckhöjd (h_t). Tryckhöjd och gravitationspotential kan dock snabbt översättas till tryckpotential, som beskrivet i (3), enligt vilken tryckpotential är negativ analog till gravitationspotential ($\psi = -z$) vid jämvikt. Begreppet bindningstryck används ofta i stället för tryckhöjd för att klargöra sammanhanget, och är praktiskt då det ger en positiv siffra, till skillnad från tryckpotential (Andersson 1972; Messing 2013). I fortsättningen av det här arbetet kommer begreppet bindningstryck användas i samband med bindnings-karaktäristikor/pF-diagram.

Som framgår av den vänstra y-axeln i figur 4 är y-axeln i en bindningskaraktäristika logaritmerad, vilket gett upphov till namnet pF-diagram. På den högra y-axeln i figur 4 avläses pF, som är den negativa tiologaritmen av h_t (eller $-\psi$), på samma sätt som pH är den negativa tiologaritmen av $\{H^+\}$ (Messing 2013).

$$pF = -\log_{10}(d_e)$$

(7)

Där F är bindningstryck eller tryckhöjd (mvp) och d_e ekvivalentpordiameter (mm). Figur 2 två innehåller också information om vattens beskaffenhet och växttillgänglighet vid olika bindningstryck. Kapillärt bundet vatten föreligger i huvudsak vid lägre bindningstryck (ca. 0–150 mvp), adsorptivt bundet vatten föreligger vid högre bindningstryck (>150 mvp). Bindningstrycket 150 mvp brukar refereras till som ”vissningsgränsen”, d.v.s. gränsen för när vattnet är så hårt bundet till markpartiklarna att ingen rot kan ta upp det. Vatten bundet med högre bindningstryck än 150 mvp är således inte växttillgängligt och vice versa (Johansson & Linnér 1977; Dane et al. 2006; Messing 2013). 150 mvp som vissningsgräns är dock snarare ett fysikaliskt mått än ett biologiskt, och många av våra kulturväxter kan lida av vattenstress långt innan vissningsgränsen är nådd och endast vatten bundet med >150 mvp återstår (Allen et al. 1998; Joel 2018).

Med kunskap om vid vilket djup grundvattenytan befinner sig vid ett givet tillfälle kan bindningskaraktäristikan användas för att beräkna jordens volymetriska vattenhalt vid hydrostatisk jämvikt (dräneringsjämvikt). Vanligen fastställs vattenhalten vid inträdd hydrostatisk jämvikt efter att jorden blivit vattenmättad av ett regn eller bevattningstillfälle. Den vattenhalt som då fås är ett maximum av vad jorden orkar hålla mot gravitationen givet grundvattenytans djup, benämns fältkapacitet och uttrycks i procent ($100 * m^3 / m^3$) eller millimeter (mm). I praktiska sammanhang fastställs fältkapaciteten för jordvolymen från markytan ned till ett visst djup, antingen 1 m eller grödans rotdjup. Subtraheras andelen av markvattnet vid fältkapacitet som har >150 mvp bindningstryck fås det växttillgängliga vatteninnehållet (Johansson & Linnér 1977; Messing 2013).

$$\theta_{Fältkapacitet} - \theta_{150\ mvp} = \theta_{Tillgängligt} (\%)$$

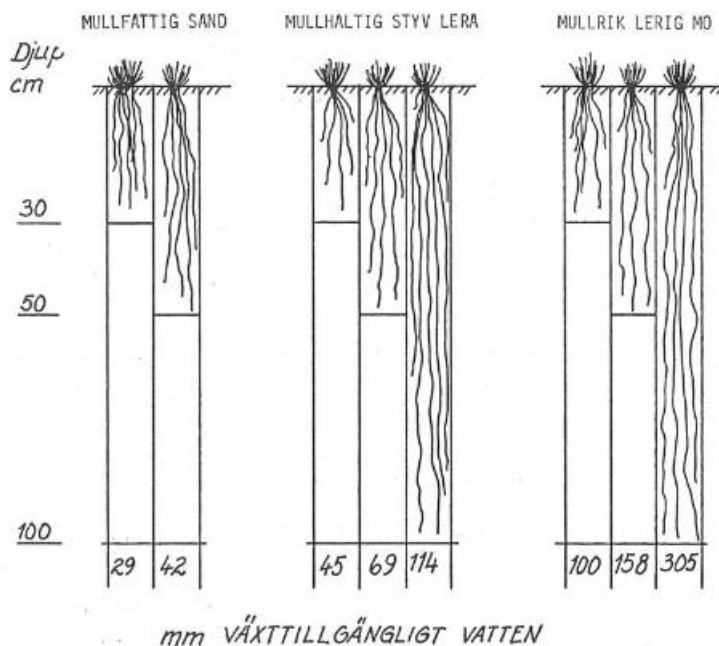
(8)

Beräkningarna i det här arbetet är baserade på FAO Drainage Paper No. 56 (Allen et al. 1998) där $\theta_{Tillgängligt}$ multipliceras med rotdjupet, benämns TAW (total available water) och uttrycks i millimeter i stället för i procent.

2.2 Vattenbalanser och evapotranspiration

I vattenbalansberäkningar antas marken vara fylld till fältkapacitet tidigt på våren då grödans tillväxt och utveckling startar. Hur mycket vatten en jord kan lagra beror på textur, struktur och mullhalt, där högre andel aggregerande jordarter, god och porös struktur samt hög mullhalt generellt ger större vattenmagasin. Störst vattenmagasin hittas dock inte bland styva leror p.g.a. deras stora andel adsorptivt

bundna vatten (Johansson & Linnér 1977). Som framgår av figur 5 spelar grödans rotdjup stor roll.



Figur 5 Växttillgängligt vatten på olika jordar vid fältkapacitet (Johansson & Linnér 1977)

Ytterligare en komplicerande faktor, som inte framgår av figur 5, är djupet vid vilket grundvattenytan befinner sig. Vid dräneringsjämvikt är grundvattenytan den punkt varifrån h_t mäts, och som kan utläsas av figur 4 gör det stor skillnad på vatteninnehållet vid fältkapacitet om grundvattenytan befinner sig på ex. 0,5 respektive 1 m djup.

Under växtsäsongen tillkommer och förloras vatten från jorden till atmosfären eller grundvattnet genom följande processer (tabell 1):

Tabell 1 In- och utflöden av vatten i en markprofil

Inflöde	Utflöde
Regn (P)	Evaporation (E)
Bevattning (I)	Transpiration (T)
Kapillär upptransport (CR)	Perkolation (DP)
	Ytavrinning (R)
Lateralt flöde (L)	Lateralt flöde (L)

Tillförsel och förlust av vatten kan även illustreras med en s.k. vattenbalans, där flödena i tabell 1 ställs upp matematisk. Skalan avgör om vissa flöden utelämnas. I hydrologiska sammanhang på stor skala inkluderas avrinning (genom mark och vattendrag). Över längre tidsperioder brukar en faktor för förändring i markens vattenförråd (ΔS) exkluderas då den på sikt utjämnas till noll (Bergström 1993). I

bevattningssammanhang, på fältskala, är tidsrymden mindre och förändringar i markens vatteninnehåll är en betydelsefull faktor. Lateralt flöde, ytavrinning och kapillär upptransport bedöms inte påverka vattenbalansen på ett plant fält i större skala under odlingssäsongen. Perkolation sker vid vatteninnehåll över fältkapacitet vilket bör undvikas vid bevattning. Vattenbalansen skulle då kunna skrivas:

$$\Delta S = P + I - E - T \quad (9)$$

Där S är markens vatteninnehåll, P nederbörd, I bevattning, E avdunstning och T transpiration. Enheten för samtliga parametrar är millimeter.

2.2.1 Potentiell evapotranspiration

Under odlingssäsong är nederbörd, evaporation och transpiration de största naturliga flödena och därför prioriteras beräkning av de tre faktorerna vid bevattningsplanering. För beräkning av potentiell evaporation och transpiration, vilka sammanslagna benämns potentiell evapotranspiration (ET_0) används i det här arbetet en modifierad Penman-Monteith-ekvation, som den beskrivs av FAO i "Irrigation and Drainage paper no. 56" (Allen et al. 1998).

Penman-Monteith-ekvationen (10) har sitt ursprung i 1940-talet då H.L Penman beskrev avdunstning genom att beräkna den tillgängliga energin för avdunstning. Avdunstningen skulle alltså beräknas utefter energibalans, snarare än vattenbalans (Eckersten et al. 2004). Ett problem med beräkning av avdunstning är att temperaturen på ytan från vilken vatten ska avdunsta, bladverket, sällan är känd. Detta hanteras i Penman-Monteith-ekvationen genom att beskriva ytans temperatur som funktion av luftens ångtryck, en faktor som benämns som s enligt Eckersten et al. (2004) respektive Δ enligt FAO (Allen et al. 1998). Här betecknas avdunstningsytans temperatur som funktion av luftens ångtryck s för tydlighetens skull.

$$\lambda ET = \frac{R_n s + \rho_a C_p \left(\frac{e_s - e_a}{r_a} \right)}{s + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right)} \quad (10)$$

Där R_n är solstrålning ovan bladverket, ρ_a luftens densitet, C_p luftens specifika värme vid ett givet tryck, e_s luftens mättnadsångtryck, e_a luftens aktuella ångtryck, r_a resistans i luften, γ "psykrometerkonstanten" (67 Pa/K) och r_c är stomataresistansen.

Produkten av Penman-Monteith-ekvationen (10), ET_0 , gäller för en välvattnad referensgröda, närmare bestämt gräs med höjden 0,12 m och specificerade egenskaper vad gäller albedo, ytresistans och marktäckningsgrad.

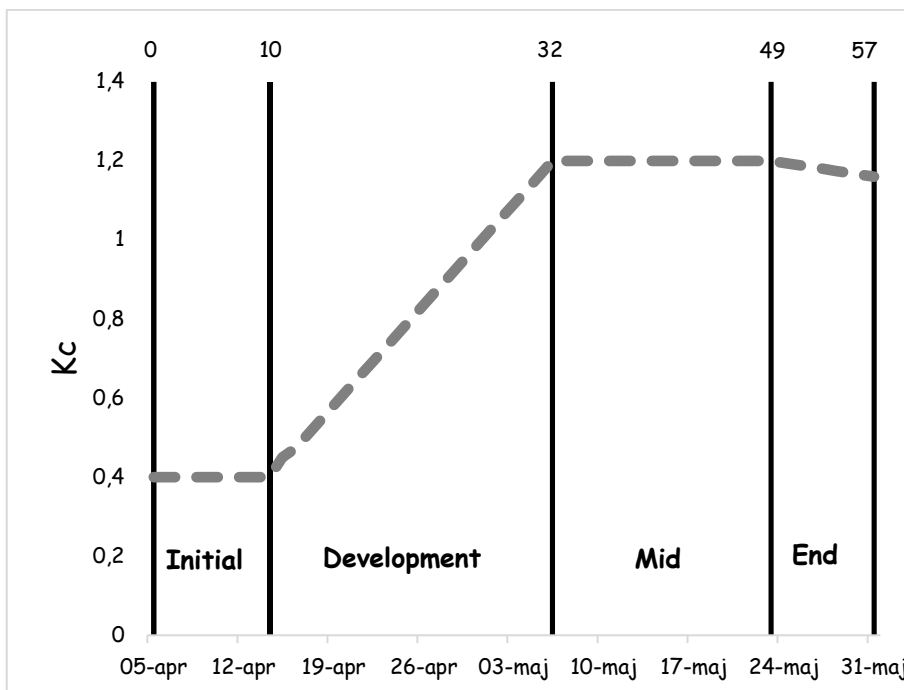
Hargreaves-metoden är en annan populär teknik för att uppskatta ET_0 . Hargreaves-ekvationen är enklare än Penman-Monteith-ekvationen, då Hargreaves enbart utgår från medel-, min- och maxtemperatur samt resistans i luften. Hargreaves-metoden rekommenderas av FAO vid avsaknad av de väderdata som krävs för Penman-Monteith-ekvationen (Allen et al. 1998:64). Möjligheten att beräkna ET_0 utan ingående väderdata med Hargreaves-metoden gör den populär då ET_0 ska beräknas över längre tidsperioder i klimatforsknings syfte (Grusson et al. 2021; Gurara et al. 2021; Vishwakarma et al. 2022). Dock kräver metoden ibland kalibrering för klimatet i området som ska studeras (Allen et al. 1998; Berti et al. 2014; Feng et al. 2018)

2.2.2 ET_c och grödkoefficienten

Odlade grödor kan variera stort i marktäckningsgrad, ytresistans och förmåga att ta upp vatten för transpiration. För att anpassa Penman-Monteith-ekvationen till att beskriva ET_0 på fält med specifika grödor, utan att behöva känna till varje grödas värde för ex. albedo och ytresistans har koefficienter tagits fram empiriskt för enskilda grödor i ett visst klimat (Allen et al. 1998:89–93). En grödkoefficient ska ta hänsyn till grödans storlek och artspecifika egenskaper som påverkar dess möjlighet till transpiration under odlings säsongen. Grödkoefficienten benämns K_c och multipliceras med potentiell evapotranspiration för att ge grödspecifik evapotranspiration, ET_c enligt:

$$ET_c = ET_0 * K_c \quad (11)$$

Värdet på K_c kan förenklat antas vara konstant över odlings säsongen eller varieras utefter grödans utveckling och tillväxt för högre precision. En varierad grödkoefficient för blandvall i vårt klimat rör sig mellan värdena 0,4–1,2 (dimensionslös). I början på säsongen är grödan liten och transpirationen låg, för att sedan öka allt eftersom grödan bestockar sig och växer. Grödans möjlighet till transpiration planar ut vid blomning, strax under den maximala nivån. För att beskriva grödans dynamiska transpiration möjligheter delas tillväxt- och utvecklingsförloppet upp i fyra faser (Allen et al. 1998:89–93), illustrerade i fig. 6. Cykeln i fig. 6 är den första från Gotland år 2020 och sträcker sig över 57 dygn. Under databehandlingen utgicks ifrån att tre växtcykler i normalfall skulle uppta 75 + 45 + 45 dygn.



Figur 6 Grödkoefficientens (K_c) faser från vårens början till första skörd, Gotland 2020

Efter en avslagning sjunker grödans möjlighet till transpiration drastiskt, och K_c -kurvan börjar om på "initial" fas (Allen et al. 1998:89–93). Grödkoefficienten kan även delas upp i en transpirationsdel och en avdunstningsdel. En tvådelad grödkoefficient är exaktare än en enkel när markytan ofta blir vätt, men kräver ingående data om enskilda markskiktets vatteninnehåll. Användning av tvådelad grödkoefficient kan vara motiverad bl.a. vid modellering av droppbevattning (Allen et al. 1998:93–101). I det föreliggande arbetet användes enkel grödkoefficient.

2.2.3 ET_c adj

Utöver faktorer som marktäckningsgrad och storlek påverkas grödans möjlighet till transpiration av dess förmåga till vattenupptag. Som beskrivet i avsnitt 2.1 är en del av markvattnet hårt bundet och svårt eller inte alls tillgängligt för växten. Så som också påpekas i avsnitt 2.1 kan en gröda på problem att ta upp vatten långt innan den fysikaliska vissningsgränsen ($\psi = 150 \text{ m v p}$) är nådd. Gränsen vid vilken en gröda drabbas av torkstress och därför minskar sin transpiration varierar mellan olika växtarter och betecknas i FAO No. 56 som p (Allen et al. 1998:162). Baserat på samma källa och tidigare svensk forskning är 0,55 ett passande p -värde för nordisk blandvall (Joel et al. 2020, 2021). En gränsfaktor för torkstress på 0,55 innebär att grödan börjar drabbas av torkstress och minskar sin transpiration då 55% av det växttillgängliga vattnet har försvunnit från marken.

För att beskriva verklig evapotranspiration hos en gröda som riskerar drabbas av torkstress används i FAO No. 56 begreppet $ET_{c\ adj}$. $ET_{c\ adj}$ är en produkt av ET_c och en begränsande torkstressfaktor (K_s) som minskar grödans evapotranspiration linjärt då mängden tillgängligt vatten i marken passerar gränsen för torkstress (Allen et al. 1998:161–168).

$$ET_{c\ adj} = ET_c * K_s$$

(12)

2.2.4 Mätningar av markvatteninnehåll

En vanlig metod för uppskattning av markens vatteninnehåll är att mäta tryckpotentialen (ψ) vilket görs med tensiometer (Johansson & Linnér 1977; Weidow 2000; Freire et al. 2018). Mätning av tryckpotential utgör ett indirekt mått på vatteninnehållet i marken eftersom tryckpotentialen måste ställas mot en pF-kurva för den aktuella jorden för att besvara vad vattenhalten är. Andra mätare och sensorer använder elektrisk konduktivitet eller permittivitet/kapacitans i förhållande till magnetfält för att beräkna volymetrisk vattenhalt, och gör anspråk på exaktheter mellan $\pm 2-4\%$ (Delta T Devices 2016; *Soil Scout FAQ* 2020; *SoilSense - Scientifically-validated sensors* u.å.). Eftersom en grödans rotfördelning och vattenupptag sällan är jämnt fördelad i djupled (Ahmadi et al. 2020; Pramanik et al. 2022) bör mätningar göras på mer än ett djup för att ge en god bild av markens vatteninnehåll. Ytterligare ett skäl till att markens vatteninnehåll varierar mellan djup är att gravitationspotentialen (z), som beskrivs i avsnitt 2.1. Direkta metoder för att mäta markens vatteninnehåll, ex. ugnstorkning av markprov, är förvisso enkla och billiga sett till utrustningen (IAEA 2008) men på grund av sin tidsåtgång mindre fältmässiga än elektriska mätinstrument.

2.3 Bevattningsförsöken L1-267, -268 och -269

De randomiserade blockförsöken L1-267 (2020), L1-268 (2021) och L1-269 (2021) är samtliga utförda på både gotländska Hallfreda och öländska Torslunda. Försöken på Gotland har varit utlagda inom 2 km från gården Lövsta och 8 km från LantMet:s väderstation Hallfreda. Jorden på Hallfreda brukas ekologiskt och är en något mullhaltig moig morän lättlera (nmh mo Mä LL), se pF-kurva i bilaga 1. På Öland har försöken L1-268 och L1-269 varit utlagda inom 1 km från försöksgården Torslunda och LantMet:s väderstation med samma namn. Jorden brukas där konventionellt, analyserades på labb och är en mullfattig sandig mo (mf sa mo), se pF-kurva i bilaga 2. L1-267 på Öland har däremot varit utlagt i Bettorp på östra Öland, ca 9 km fågelvägen från Torslunda. Den likaledes konventionellt brukade

jorden i Bettorp analyserades inte utan genomgick endast jordartsbestämning, jorden är en måttligt mullhaltig moig morän lättlera (mmh mo Mä LL). pF-kurvan för jorden på Bettorp är antagen utefter en liknande jord som analyserats av Andersson (1972), se delavsnitt 3.1. I försöken användes två olika vallblandningar. För L1-268 användes Lantmännens Indus 21, innehållande 40 % lusern Nexus och 60 % hundäxing Svante. I försöken L1-267 och L1-269 användes Lantmännens Mira 11, innehållande 15 % rödklöver Ares, 25% timotej Grindstad, 30% timotej Switch och 30% ängssvingel SW Minto.

I försöket testades tre olika bevattningsstrategier mot en obevattnad kontroll. De tre bevattningsstrategierna var: bevattning hela säsongen (2), bevattning till första skörd (3) och bevattning till andra skörd (4). Den obevattnade kontrollen benämns här som behandling 1. Inom varje behandling gjordes fyra upprepningar. Varje upprepning var försedd med mätrör för vattenhaltsmätningar med en Delta-T Profile Probe PR2 SD12. Bevattningen utfördes med bevattningsramp i givor om 20–30 mm och i ett enstaka tillfälle 45 mm utefter nederbördsunderskott, s.k. tillskottsbevattning. Försökens totalgivor av vatten, skördedatum med mera framgår av tabell 2.

Tabell 2 Bevattnings- och skördeparametrar för försöken L1-267 (2020), L1-268 (2021) och L1-269 (2021)

Försöksår	Antal skördar	Skördedatum	Vallblandning	Bevattning	Bevattning	Bevattning
				beh. 2 (mm)	beh. 3 (mm)	beh. 4 (mm)
Gotland L1-267	3	1/6, 6/7, 24/8	Mira 11	200	55	110
Gotland L1-268	3	31/5, 13/7, 1/9	Indus 21	160	25	130
Gotland L1-269	3	31/5, 14/7, 31/8	Mira 11	160	25	130
Öland L1-267	4	28/5, 6/7, 26/8, 30/9	Mira 11	168	45	108
Öland L1-268	3	28/5, 6/7, 3/9	Indus 21	140	20	80
Öland L1-269	3	2/6, 12/7, 2/9	Mira 11	140	20	80

3. Metod

Nedan beskrivs i detalj hur en vattenbalans sattes upp för de studerade försöksåren, hur mätdata från försöken hanterats samt hur vattenbalansberäkningar och mätdata jämförts. Särskild vikt har lagts vid att nämna antaganden som gjorts för att göra beräkningar och mätdata jämförbara och ändamålsenliga. I arbetet har Microsoft Excel använts för hantering av både vattenbalansberäkningar och mätdata.

3.1 Vattenbalansberäkningar

I arbetet har vattenbalanser för olika försöksår på Gotland och Öland hanterats separat. För samtliga år har väderdata för beräkning av ET_0 har hämtats från vädertjänsten LantMet, från väderstationerna Hallfreda respektive Torslunda. För beräkning av ET_0 krävs förutom väderparametrarna minsta temperatur, högsta temperatur, genomsnittlig luftfuktighet, solinstrålning och genomsnittlig vindhastighet även lokalens latitud och altitud.

Vattenbalanser har satts upp i enlighet med vad som beskrivs i FAO Drainage and Irrigation paper no. 56 för grödors evapotranspiration under torkstress (Allen et al. 1998:161–168), utan hänsyn till ytavrinning eller kapillär upptransport. Mängden totalt växttillgängligt vatten (TAW), gränsen för torkstress (p) och mängden växttillgängligt vatten före torkstress induceras, s.k. direkt tillgängligt vatten (RAW) har beräknats för jordarna där de olika försöken var förlagda. Beräkningarna baserades på jordartsanalys och test av vattenhållande förmåga vid olika bindningstryck, vilka genomfördes inom ramen för försöken. Ett undantag gjordes för L1-267 på Öland 2020, där försöksplatsen låg längre ifrån väderstationen än 2021 års försöksplats. Enbart en jordartsanalys hade gjorts för den öländska försöksplatsen från 2020. Baserat på jordartsanalysen antogs en pF-kurva från en liknande jord, framtagen av Andersson (1972:89), gälla för den försöksplatsen. pF-kurvan som valdes var ”5 Svenstorp nr. 1–57. Beräkningar av växttillgängligt vatten har gjorts utefter antagandet att grundvattenytan befinner sig på 1 m djup under hela säsongen. Både p och rotdjupet (Z_r) har antagits vara oförändrade under odlingssäsongen av nedan angivna orsaker. Faktorn p kan enligt Allen et al. (1998:162–167) varieras då ET_c ofta överstiger 5 mm/d för att bättre beskriva grödans möjlighet till transpiration. Vid hög ET_c ökas då faktorn p för att efterlikna att grödan stänger sina klyvöppningar för att spara vatten (Allen et al.

1998:162). Under de undersökta försöksåren överstiger ET_c mycket sällan 5 mm/d varför p hanterats som konstant. Ingen dokumentation av rotdjupet genomfördes under något av försöksåren. Då grödan är perenn och för att underlätta jämförelser med uppmätta markvatteninnehåll antogs rotdjupet vara konstant och uppgå till 0,5 m, vilket överensstämmer med tabellvärden för rotdjup hos en blandvall enligt (Allen et al. 1998:163–165). $\theta_{\text{Tillgängligt}}$ vid 1m djup (mm) multipliceras med rotdjupet (Z_r) för att få mängden växttillgängligt vatten grödan kan utnyttja (TAW).

Latituderna som användes i beräkningarna var 57.5223 för de gotländska försöken, för Öland användes latituden 56.6317. För båda platserna har altituden 21 m ö h använts, vilket är korrekt för den gotländska försöksplatsen men sannolikt något högt för de öländska, som ej framgick vid tiden för databehandling.

Tabell 3 Försöksplatsernas jordars markfysikaliska parametrar

Försöksår	$\theta_{\text{Fältkapacitet}}$ 1m	$\theta_{150\text{mvp}}$	TAW (mm)	p	RAW (mm)	Z_r (m)
Gotland 2020	250,3	97,7	125,2	0,55	62,6	0,5
Gotland 2021	250,3	97,7	125,2	0,55	62,6	0,5
Öland 2020	243	105	121,5	0,55	66,8	0,5
Öland 2021	242,5	30,8	121,2	0,55	66,7	0,5

Där TAW är totalt tillgängligt vatten, p gränsen för torkstress, RAW direkt tillgängligt vatten och Z_r rotdjupet. Grödkoefficienten (K_c) har hanterats som beskrivet i avsnitt 2.2.2 och kurvan har anpassats utefter klimat och skördedatum för vart år och försöksplats. Enligt rekommendation av Joel¹ initieras grödans utveckling, tillväxt och K_c -kurva då medeltemperaturen överstiger 5 °C under en vecka, vilket överensstämmer med SMHI:s definition av vegetationsperiodens start (*Klimatindikator - vegetationsperiodens längd*, SMHI 2022). Längden på grödkoefficientens faser anpassades sedan utefter skördedatum, där framför allt den sista fasen (late) ändrats för att spegla moderna skördestrategier med tidiga skördar¹.

I enlighet med metoden i Allen et al. (1998) hanterades markens vatteninnehåll som ett underskott från fältkapacitet, benämnt D_r . Vattenbalansen beräknas på dygnsbasis, där ingångsvärdet för markens vatteninnehåll dagen j är det samma som utgångsvärdet för dagen $j-1$. Utgångsvärdet, markvatteninnehållet vid dagen j :s slut ($D_{r \text{ ut } j}$) beräknas enligt ekvation 13, där P betecknar nederbörd och I bevattning. Både $D_{r \text{ in}}$ och $D_{r \text{ ut}}$ är begränsade till att inte understiga 0, överskottsvatten antas dräneras bort till nästa dygn.

¹ Abraham Joel, docent, SLU, handledningsmöte 2022-03-25

$$D_{r\text{ ut } j} = D_{r\text{ in } j} + ET_{c\text{ adj } j} - P_j - I_j \text{ (mm)}$$

(13)

Som beskrivet i avsnitt 2.2.3 används torkstressanpassad evapotranspiration ($ET_{c\text{ adj}}$) för vattenbalansberäkningarna, vilket är produkten av ET_c och torkstresssfaktorn K_s . K_s simulerar att grödans möjlighet att ta upp vatten för transpiration försämras då andelen kapillärt vatten i marken minskar, och sugkraften som krävs av grödan ökar. Vid god vattentillgång är K_s satt till 1. Efter att markens vatteninnehåll minskat med 55 % (p) och således passerat RAW ($pTAW$) går K_s linjärt mot 0. I praktiken förbjuder K_s att markens vattenunderskott ($D_{r\text{ in}}$ och $D_{r\text{ ut}}$) överstiger TAW.

3.2 Mätningar av markvatteninnehåll

Mätningar av markvatteninnehåll har utförts inom intervall av ca en vecka, under maj – september samtliga försöksår. Mätningarna utfördes med en Delta-T Profile Probe PR2 SDI-12, vilken mäter permittivitet/kapacitans på 5, 15, 25 och 35 cm djup och beräknar markens volymetriska vatteninnehåll (θ) för respektive djup. Vattenhalten avläses på från en handenhet som den i figur 7. För att göra mätningarna jämförbara med vattenbalansberäkningarna, där rotdjupet 0,5 m användes, antogs att $\theta_{45\text{cm}}$ var identisk med $\theta_{35\text{cm}}$.

Försöken är upplagda med fyra behandlingar och fyra upprepningar, där varje parcell (upprepning) har ett neddrivet rör för markvattenmätningar, som det i figur 8.



Figur 8 Mättrör och del av installationsutrustning Figur 7 Handenhet vid mätning

Vid varje mättillfälle har tre mätningar gjorts per mättrör. För varje mätning roteras mätaren 1/3 varv i röret för att kompensera för eventuell sten eller kompakterad jord i anslutning till röret i någon riktning som skulle kunna påverka mätsvaret. I databehandlingen användes ett medelvärde av de tre mätningarna från varje djup. Handenheten ger mätsvar i procent ($100 * m^3 \text{ vatten } m^{-3} \text{ jord}$), vid databehandling har mängden vatten på samtliga djup summerats och omräknats till millimeter. Mätdata har sedan sorterats efter behandling i tidsserier. Totalt gjordes 5712 mätningar under de sex försöksåren, motsvarande 238 mätningar i varje behandling fördelade på ca 80 mättillfällen vart försöksår. I de fall en mätning inte gett något mätsvar, eller då mätsvaret varit ofullständigt har mätningen för röret i fråga undantagits i databehandlingen. Totalt undantogs 264 mätningar från analys, motsvarande 4,6 % av det totala antalet mätningar.

3.3 Jämförelser av mätdata och vattenbalans

När så en tidsserie av uppmätta värden på markvatteninnehåll respektive en vattenbalans för ett försöksår konstruerats så har dessa ställts mot varandra. För att förenkla jämförelsen och bli mindre beroende av exaktheten hos uppskattningen av markens vattenhållande förmåga så har förändringar av markvatteninnehåll ($\Delta\theta$) analyserats i stället för absolutvärden. Absolutvärdena från mätningarna varierar ibland inom en behandling, trots att parcellerna där mättrören drivits ned ligger på samma fält. Skillnaden mellan mättrör inom samma behandling är som störst vid de allra första mätningarna på våren, då markens vatteninnehåll är som störst. Skillnaderna mellan mättrör på samma fält kan då uppgå till så mycket som 40 mm, vilket kan motsvara 30 – 50 % av vatteninnehållet på en mätplats. Förändringen från ett mättillfälle (i) till nästa ($i+1$) är mer konsekvent inom varje behandling än absolutvärdena för samma mättillfällen, och värdena som jämförs blir på det viset mindre känsliga för skillnader i ex. jordart mellan mätplatserna. Problem med osannolika absolutvärden från mätningar med samma sorts sond som i försöken L1-267, -268 och -69 har beskrivits av Larsson (2020), vilket ytterligare motiverat metoden att analysera skillnader i stället för absolutvärden.

$$\Delta\theta = \theta_{i+1} - \theta_i \text{ (mm)}$$

(14)

Datan från vattenbalansen hanterades på samma sätt som mätdatan. Vattenbalansen är beräknad på dygnsbasis och har ett ingångs och ett utgångsvärde för markens vatteninnehåll per dygn, uttryckt som ett underskott (D_r). Tidsstegen som använts har varit de samma som för mätdatan, d.v.s. ungefärligen veckovisa. Vid en mätning av markens vatteninnehåll med en Delta-T Profile Probe PR2 SDI-12 följer information om datum och tid för mätningen. Detta har gett möjlighet att anpassa vilket värde från vattenbalansberäkningarna ($D_{r\ in}$ resp. $D_{r\ ut}$) som ska användas för jämförelser med mätningar. I de fall där en mätning utförts före kl. 12 på dagen har $D_{r\ in}$ använts, d.v.s. underskottet av markvatten kl. 00:00. På motsvarande sätt har $D_{r\ ut}$, underskottet av markvatten kl. 23:59, använts när mätningar är utförda efter kl. 12 på dagen. Anpassningen gjordes med föresatsen att undvika onödiga missjämförelser, som t.ex. att ett nederbördstillfälle mellan en mätning och dagens slut inte skulle göra jämförelsen felaktig.

$$\Delta D_r = D_{r\ i+1} - D_{r\ i} \text{ (mm)}$$

(15)

Förändringen i uppmätt vatteninnehåll och förändringen i vattenunderskott enligt vattenbalansberäkningarna har sedan plottats mot varandra i linjediagram för grafisk analys. För matematisk analys har beräkning av korrelationskoefficient (r) tillämpats på inrådan av Centrum för Statistik på SLU. Valet av r över r^2 , som används av Gassmann et al. (2011) för en liknande jämförelse, motiveras med att de två undersökta variablerna inte är beroende av varandra. Analysen i det föreliggande arbetet gäller hur väl variablerna stämmer överens snarare än i vilken utsträckning variansen i den ena variabeln kan förklaras med värdet på den andra. I ekvation 16 och 17 betecknas förändringen i uppmätt vatteninnehåll ($\Delta\theta$) som U, och förändring i vattenunderskott enligt vattenbalansberäkningar (ΔD_r) som B

$$r = \frac{cov(U, B)}{\sigma_U \sigma_B}$$

(16)

Utöver korrelationskoefficienten beräknades MBE ("mean biased error") i enlighet med metoden hos en liknande studie (Gassmann et al. 2011). Ett tillägg har dock gjorts till beräkningen, som den är uttryckt i ekvation 17. Värdena för $B_i - U_i$ har satts till att vara positiva. Negativa skillnader mellan B och U har alltså beräknats $-(B_i - U_i)$. Förändringen gjordes med föresatsen att bättre spegla hur mycket B i genomsnitt avviker från U, utan att omväxlande positiva och negativa skillnader skulle jämna ut MBE till nära noll vilket annars blev fallet. Under databehandlingen ansågs det viktigare att visa hur stor beräkningarnas totala avvikelser från mätningarna var än i vilken riktning en liten netto-avvikelse var.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (B_i - U_i)}{n}$$

(17)

Då MBE beräknats utan hänsyn till att skillnaden mellan B och U kan vara både positiv och negativ gjordes en enkel beräkning av hur stor andel av mättillfällena i en behandling som B överskrider U, d.v.s. hur ofta vattenbalansberäkningarna överskattade förändringen till nästa mättillfälle. Avslutningsvis beräknades medelvärden av samtliga ovan beskrivna statistiska parametrar för respektive år och behandling. Föresatsen var att utröna om vattenbalansberäkningarna var mer ackurata vissa år eller vid en viss bevattningsstrategi.

4. Resultat

I avsnitt 4 presenteras arbetets resultat, med början i en översikt över försöksårens väder och markvattentillstånd vid olika tillfällen. I delavsnitten 4.2 och 4.3 presenteras linjediagram för överensstämmelsen mellan beräknad och uppmätt förändring i vattenförråd under samtliga år och behandlingar. Delavsnitten är uppdelade efter försöksplats snarare än försöksår av utrymmesskäl.

4.1 Nederbörd och ET0 2020-2021

Nedan följer en kort beskrivning av årsmånen 2020 och 2021 på Gotland respektive Öland samt hur den påverkade grödan i försöken. Som framgår av figur 1 i avsnitt 1 var åren 2020–21 inga rekordår vad gäller nederbördsunderskott på femårsbasis, även om enskilda månader kunde vara ovanligt blöta eller torra. Att behovet av bevattning likväl var stort framgår av att underskottet på markvatten i obevattnade led (behandling 1) var högt redan vid tiden för första skörd under flertalet av åren, se tabell 4. I tabell 4 har också de obevattnade ledens vattenunderskott den sista augusti medtagits för att visa på skillnaderna mellan årens nederbördsfördelning under sensommaren.

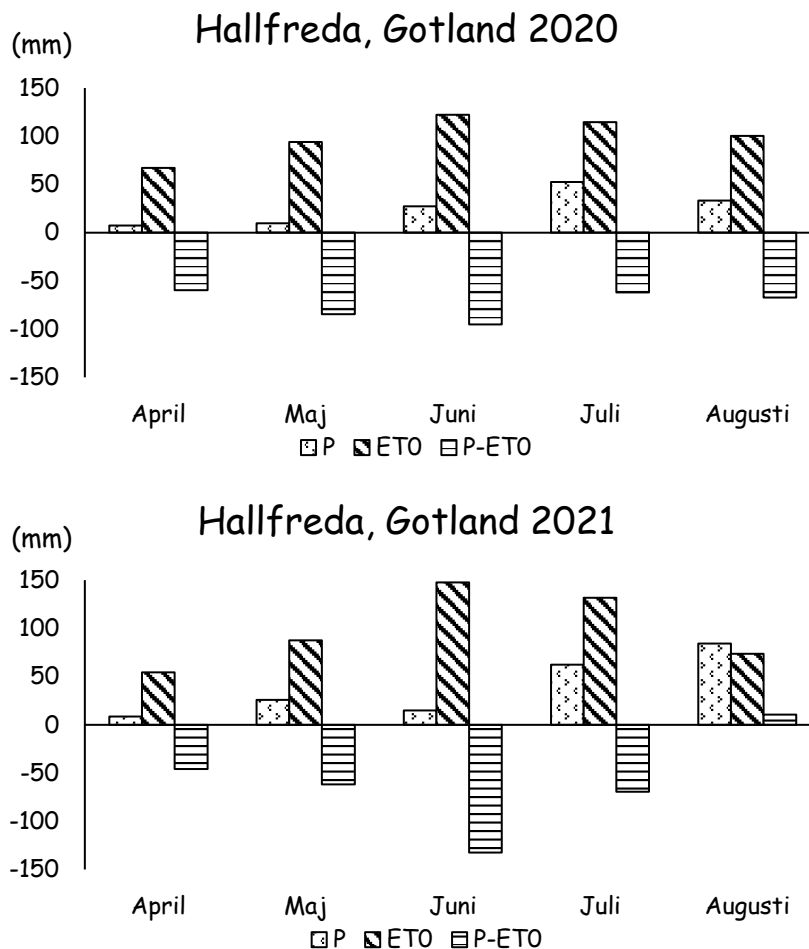
Tabell 4 Belysande datum och markvattentillstånd från de olika försöksåren enligt vattenbalansberäkningarna

Försök	Plats	Datum för tillväxtstart	Datum för 1:a skörd	Totalt antal dygn med vattenstress (mar-aug) i obevattnat led (d)	Obevattnat leds underskott från fältkapacitet vid 1:a skörd (mm)	Obevattnat leds underskott från fältkapacitet den 31/8 (mm)
L1-267	Gotland	2020-04-05	2020-06-01	108	109	93
L1-268	Gotland	2021-03-23	2021-05-31	107	97	68
L1-269	Gotland	2021-03-23	2021-05-31	107	97	66
L1-267	Öland	2020-03-16	2020-05-28	118	96	8
L1-268	Öland	2021-04-05	2021-05-28	77	41	7
L1-269	Öland	2021-04-05	2021-06-02	78	58	6

4.1.1 Gotland

År 2020 på Gotland var det torraste året i hela försöksserien, sett till nederbördsunderskottet. Det totala nederbördsunderskottet ($P-ET_0$) uppgick till 368 mm mellan april och augusti. Till skillnad från år 2021 föll mindre regn under augusti månad år 2020 på Gotland. Grödan i det obevattnade ledet hade 101 dagar under torkstress ($K_s < 1$) av de 145 dagarna mellan tillväxt-start och tredje skörd. Grödan i behandling 2 (bevattning hela säsongen) bevattnades fram tills den 13/8, totalt med 200 mm, men hade likväl en viss torkstress i 63 dagar. K_s närmade sig vid vissa tillfällen 0,5 för grödan i behandling 2.

År 2021 på Gotland var nederbördsunderskottet inte lika högt som år 2020, vilket berodde på högre nederbörd 2021 snarare än lägre evapotranspiration ET_0 2021 avvek endast med 4 mm från året innan. Totalt uppgick nederbördsunderskottet år 2021 till 299 mm på Gotland. Den något lägre evapotranspirationen under april och maj 2021 jämfört med året innan berodde i huvudsak på lägre temperaturer under april och mer mulet väder under maj.



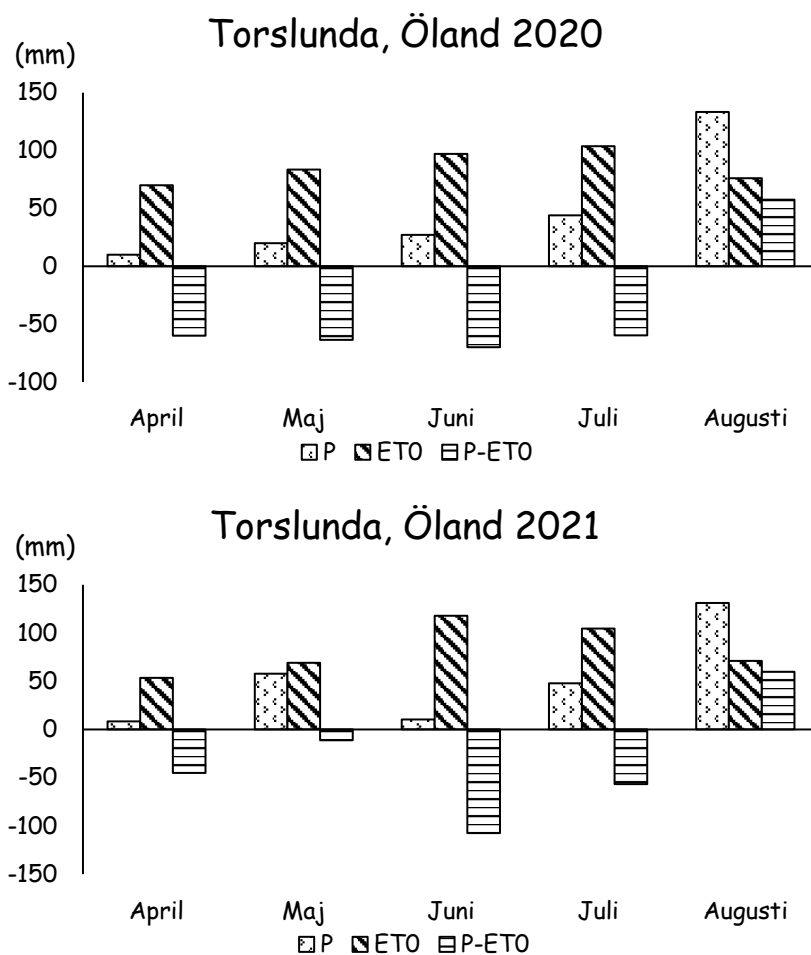
Figur 9 Nederbörd och evapotranspiration på Halfreda under odlingssäsongerna 2020 och 2021

4.1.2 Öland

Nederbördsunderskottets fördelning under odlingsäsongerna 2020 och 2021 på öländska Torslunda skiljer sig relativt tydligt från de på Hallfreda. Under år 2020 på Öland fördelade sig nederbördsunderskottet mycket jämnt över månaderna april-juli. I likhet med de andra försöksåren blev dock juni månad den torraste månaden, om än med knapp marginal.

Grödan i det obevattnade ledet drabbades enligt beräkningarna av torkstress redan en månad innan första skörden, vilken inföll den 28/5. Både 2020 och 2021 var augusti månader mycket nederbördsrika, men båda åren var den nederbörden koncentrerad till den senare halvan av augusti.

År 2021 på Öland var nederbördsunderskottet förhållandevis lågt fram till juni månad, varvid torkan slog till fort. Under de tio dygn mellan den 1/6 och då torkstress först initierades enligt beräkningarna hade drygt 20 mm försvunnit i det obevattnade ledet i försök L1-268.



Figur 10 Nederbörd och evapotranspiration på Torslunda under odlingsäsongerna 2020 och 2021

4.2 Markvattenförrådets förändringar på Gotland

I avsnittet presenteras resultat av jämförelser mellan hur förrådet av markvatten förändrats enligt uppmätta data respektive enligt beräkningarna med vattenbalans på gotländska Hallfreda. Som påpekats ovan har jämförelserna gjorts på förändringar av markvattenförråd snarare än absolutvärden för att göra jämförelserna mindre känsliga för ex. jordartsskillnader på fälten. Samma princip har följts vid presentationen av resultaten nedan (fig. 11–16).

I de gotländska försöken stämde de beräknade förändringarna i markvattenförråd väl överens med de uppmätta förändringarna. Jämförs behandlingarna mellan varandra åstadkoms bäst överensstämmelse vid bevattning fram till andra skörd, men skillnaderna var små. Jämförs i stället resultaten i olika försök var skillnaderna något större, och bäst överensstämmelse åstadkoms då under det första försöksåret: L1-267 2020. Det genomsnittliga r -värdet för samtliga år var 0,81.

Tabell 5 Korrelationskoefficienter (r) för försöken på Gotland

Försök				
Behandling	L1-267	L1-268	L1-269	Medel (Behandling)
1	0,78	0,76	0,87	0,81
2	0,93	0,74	0,73	0,80
3	0,84	0,73	0,84	0,80
4	0,90	0,83	0,81	0,85
Medel (försök)	0,86	0,77	0,81	0,81

Grafiskt (se fig. 11–13) framstår skillnaderna mellan beräknad och uppmätt förändring i vattenförråd vara som störst i början och slutet av en säsong, i samband med större nederbördstillfällen. Trenden är mindre tydlig 2020 då kraftigare nederbörds-tillfällen saknades på våren och hösten, och det året blev också r -värdet som högst.

I de gotländska försöken var det genomsnittliga värdet för MBE (i positiva tal enbart) 6,28 mm. Med ett MBE-värde på 6,28 menas att beräkningarna i genomsnitt avvek från mätningarna med 6,28 mm i sin uppskattning av markvattenförrådets förändring från ett mättillfälle till nästa. Även sett till MBE var det första försöksåret det med bäst överensstämmelse mellan beräkningar och mätdata.

Tabell 6 Mean biased error baserat på positiva tal för försöken på Gotland (mm)

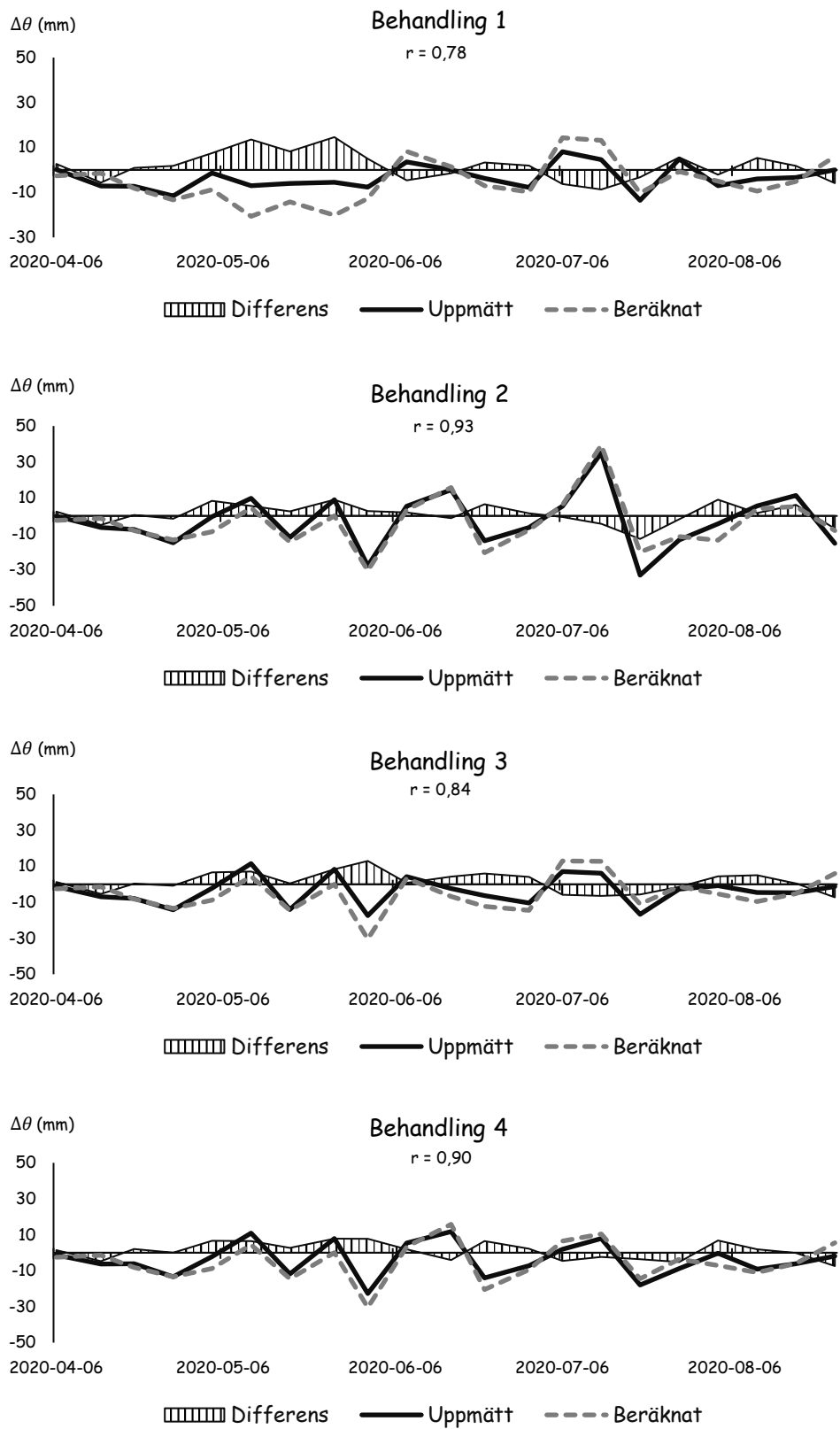
Försök				
Behandling	L1-267	L1-268	L1-269	Medel (Behandling)
1	5,25	5,72	5,05	5,34
2	4,36	7,95	9,54	7,28
3	4,32	7,12	6,15	5,87
4	4,10	6,95	8,86	6,64
Medel (försök)	4,51	6,93	7,40	6,28

Beräkningarna i de gotländska försöken tenderade under alla år och behandlingar att överskatta förändringen av markvatteninnehåll jämfört med de uppmätta värdena oftare än tvärtom. I genomsnitt över alla försöksår och behandlingar överskattade beräkningarna förändringen i 64 % av fallen, en relativt liten marginal.

Tabell 7 Utsträckningen i vilken markvattenförrådets förändring överskattats av beräkningarna i de gotländska försöken

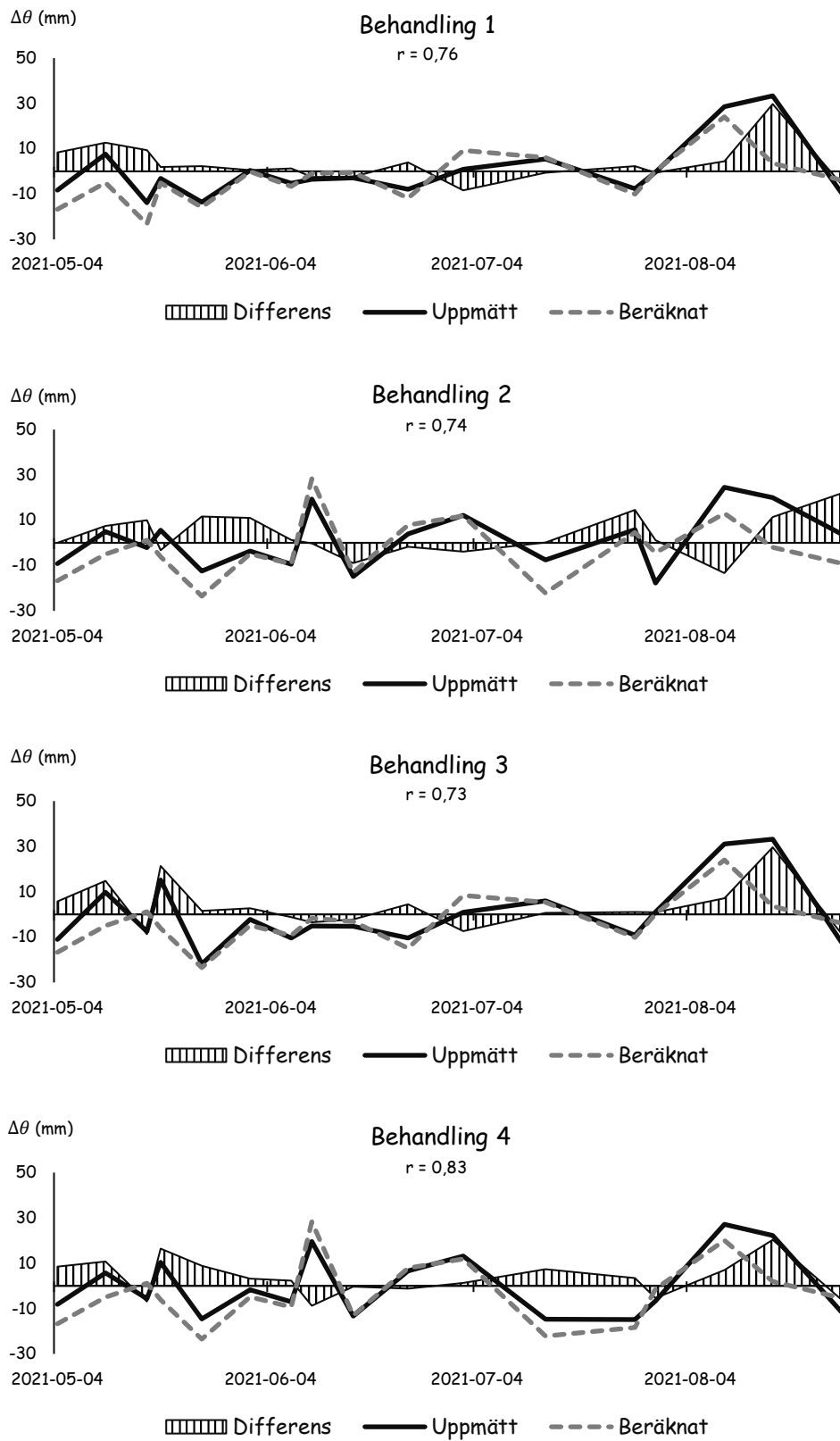
Försök				
Behandling	L1-267	L1-268	L1-269	Medel (behandling)
1	62%	65%	71%	66%
2	62%	65%	65%	64%
3	67%	65%	59%	63%
4	62%	65%	65%	64%
Medel (försök)	63%	65%	65%	64%

4.2.1 L1-267 2020



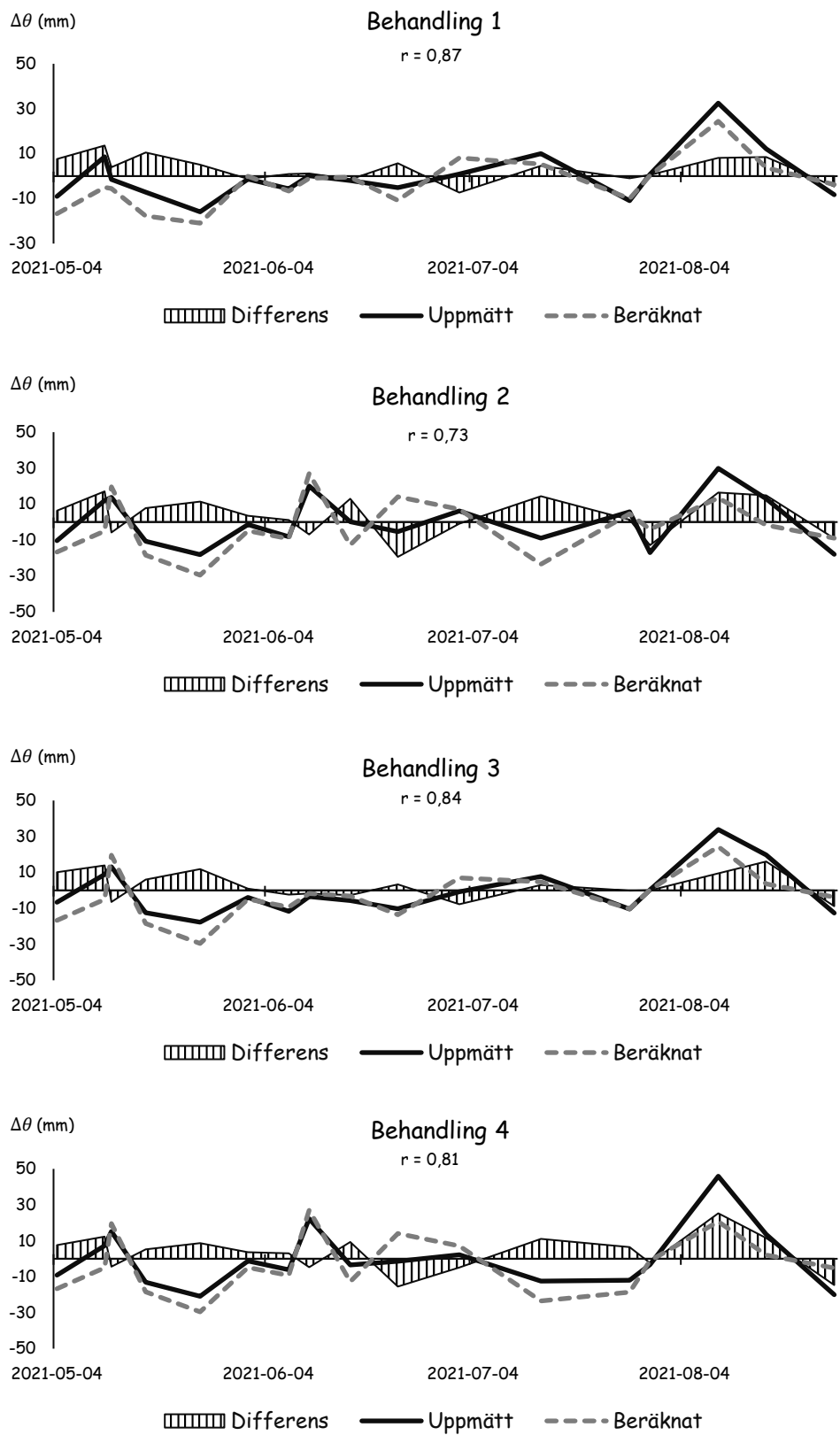
Figur 11 Uppmätt och beräknad veckovis förändring i markvatteninnehåll på Hallfreda 2020

4.2.2 L1-268 2021



Figur 12 Uppmätt och beräknad veckovis förändring i markvatteninnehåll på Hallfreda 2021 (L1-268)

4.2.3 L1-269 2021



Figur 13 Uppmätt och beräknad veckovis förändring i markvatteninnehåll på Hallfreda 2021 (L1-269)

4.3 Markvattenförrådets förändringar på Öland

Avsnitt 4.3 behandlar skillnaderna mellan beräknad och uppmätt förändring av markens vatteninnehåll under försöken på öländska Torslunda 2020–2021. Försöken på Torslunda utfördes på lättare jordar än de på Hallfreda och under det första försöksåret togs fyra skördar, till skillnad från de andra försöksåren då det togs tre skördar.

Vad gäller korrelationskoefficient blev resultaten av försöken på Öland mycket lika de på Gotland, med ett bestämt undantag. Det första försöksåret på Öland, L1-267 2020, blev korrelationskoefficienten tydligt lägre än de båda försöken 2021. Skillnaderna mellan r-värden för behandlingarna inom L1-267 blev också större än under de andra försöken 2021. Om försöken L1-268 och -269 kan sägas att deras genomsnittliga r-värden blev höga och identiska, men att r-värdena för respektive behandling inte blev identiska mellan försöken trots att de utfördes under samma kalenderår. Hade resultaten från försöket L1-267 utelämnats hade det genomsnittliga r-värdet blivit 0,88 för försöken på Öland.

Tabell 8 Korrelationskoefficienter (r) för försöken på Öland

Försök				
Behandling	L1-267	L1-268	L1-269	Medel (behandling)
1	0,60	0,90	0,87	0,79
2	0,48	0,84	0,90	0,74
3	0,70	0,90	0,88	0,83
4	0,57	0,87	0,87	0,77
Medel (försök)	0,57	0,88	0,88	0,78

Grafiskt framstår de största enskilda skillnaderna i de öländska försöken mellan beräknad och uppmätt förändring i vattenförråd inträffa vid regntillfällena i augusti. Ökningarna i markvattenförråd som uppträder i fig. 14–16 i samtliga behandlingar inträffar efter sista bevattningstillfälle i behandlingarna 3 och 4 varför de bara kan förklaras av regn. Beräkningarna förutspår typiskt då en ökning av vattenförrådet i marken som enligt mätningarna är mindre än vad beräkningarna visar och inträffar först senare.

Försöket L1-267 på Torslunda sticker ut även vad gäller MBE, på så vis att beräkningarna i snitt avvek från mätningarna med 14,9 mm från ett mättillfälle till nästa – nära dubbelt så mycket som för de båda försöken 2021. Skillnaderna mellan behandlingar är oregelbunden, sett till genomsnittsvärden för samtliga försöksår. Om resultaten från L1-267 utelämnats hade det genomsnittliga värdet på MBE blivit ca 8,2 mm på Öland.

Tabell 9 Mean biased error baserat på positiva tal för försöken på Öland (mm)

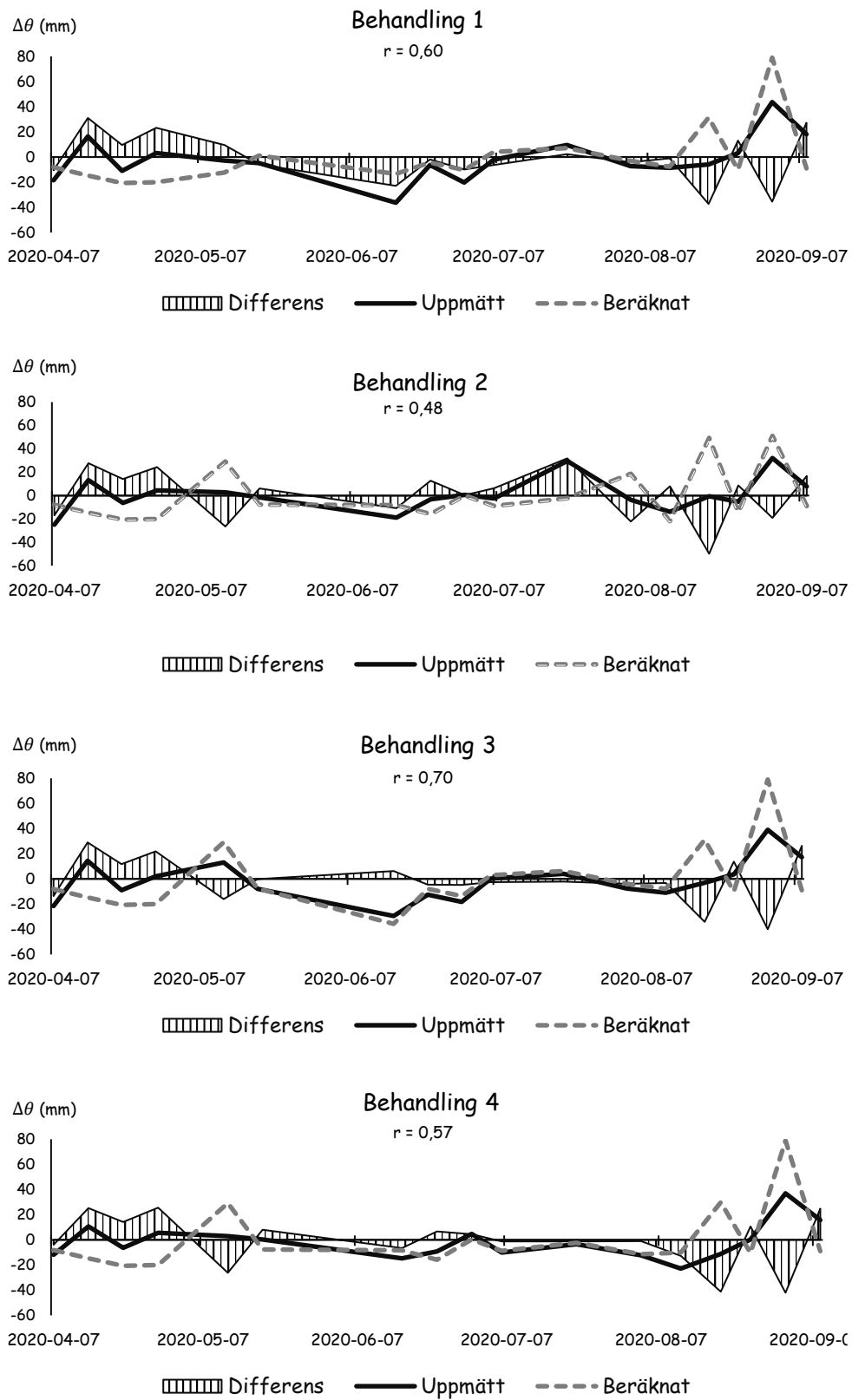
Försök				
Behandling	L1-267	L1-268	L1-269	Medel (Behandling)
1	14,78	7,96	7,88	10,21
2	16,01	9,22	7,68	11,56
3	13,75	7,62	7,58	9,65
4	15,03	8,52	8,71	10,75
Medel (försök)	14,89	8,33	7,96	10,54

Som i försöken på Gotland så överskattar beräkningarna förändringen av markens vattenförråd jämfört med mätningarna oftare än tvärtom i de öländska försöken. Marginalen är dock ännu knappare än på Gotland. I genomsnitt överskattade beräkningarna den uppmätta förändringen i drygt 53 % av fallen, om L1-267 utelämnats hade samma siffra uppgått till strax under 57 %. L1-267 sticker ut även i denna parameter, på så sätt att L1-267 var det enda försöksåret då beräkningarna i genomsnitt underskattade förändringen i markens vattenförråd, om än med liten marginal. Trenden till överskattning bedöms inte vara tillräckligt tydlig för att dra några slutsatser om systematiska beteenden hos beräkningsmodellen.

Tabell 10 Utsträckningen i vilken markvattenförrådets förändring överskattats av beräkningarna i de öländska försöken

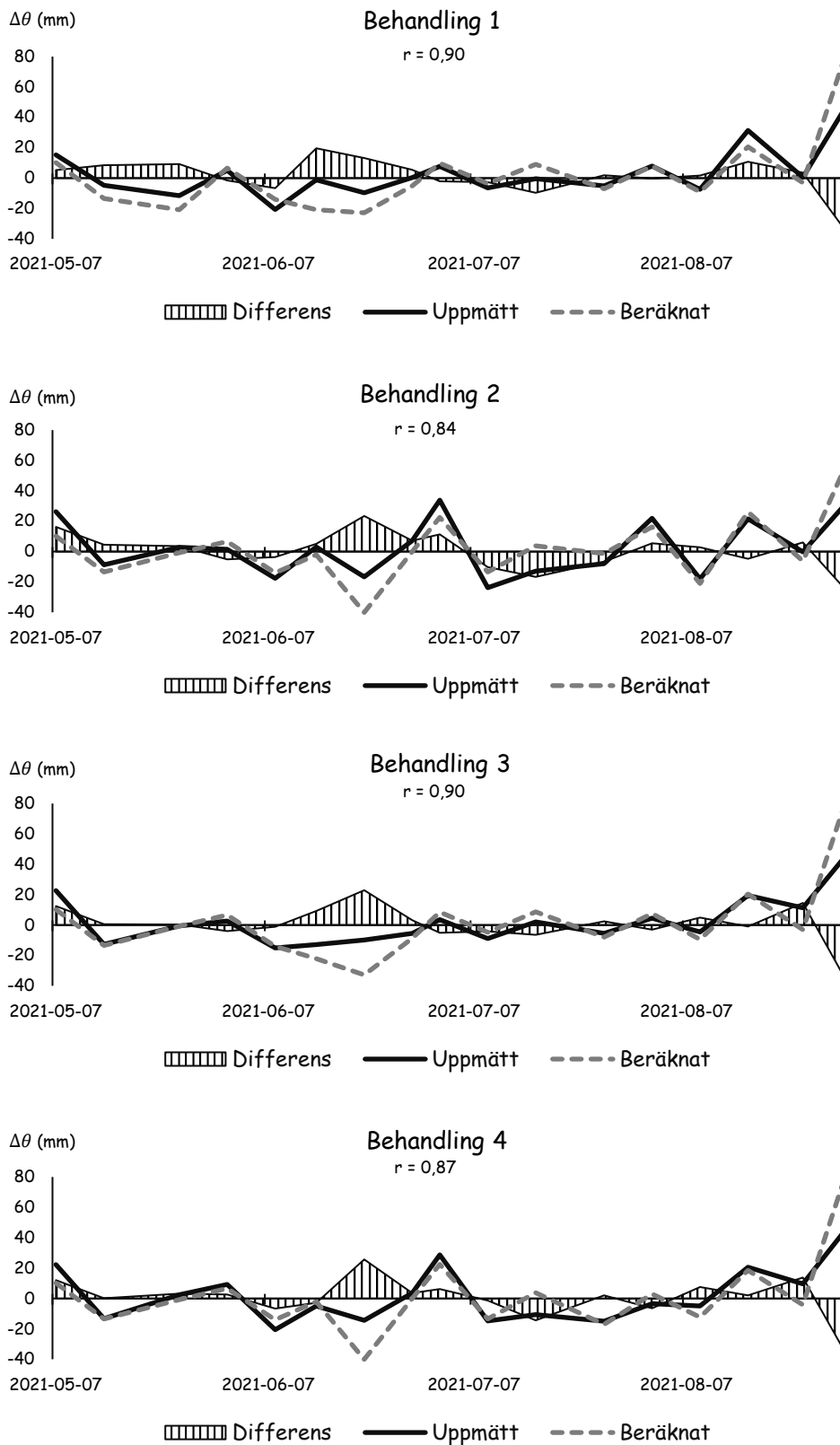
Försök				
Behandling	L1-267	L1-268	L1-269	Medel (Behandling)
1	41 %	59 %	53 %	51 %
2	65 %	59 %	47 %	57 %
3	35 %	53 %	65 %	51 %
4	47 %	65 %	53 %	55 %
Medel (försök)	47 %	59 %	54 %	53 %

4.3.1 L1-267 2020



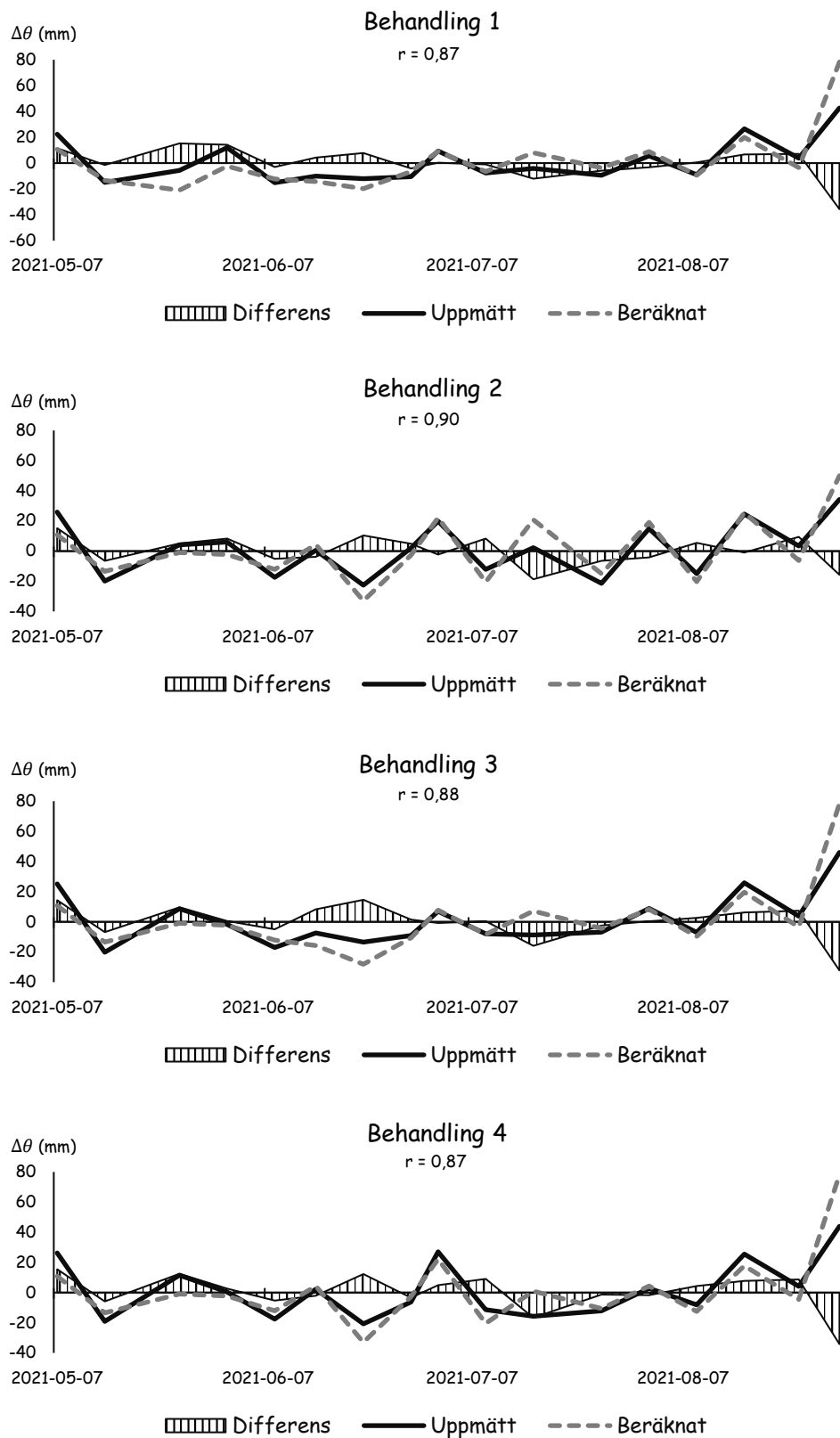
Figur 14 Uppmätt och beräknad veckovis förändring i markvatteninnehåll på Toroslunda 2020

4.3.2 L1-268 2021



Figur 15 Uppmätt och beräknad veckovis förändring i markvatteninnehåll på Toroslunda 2021 (L1-268)

4.3.3 L1-269 2021



Figur 16 Uppmätt och beräknad veckovis förändring i markvatteninnehåll på Toroslunda 2021 (L1-269)

5. Diskussion

Resultaten pekar på att vattenbalansberäkningarna stämde väl överens med de uppmätta förändringarna i vattenförråd med undantag för år 2020 på Öland. Frånsett år 2020 på Öland var resultaten jämna vilket talar för att försöken och analysen hanterats på ett konsekvent sätt på de olika försöksplatserna.

5.1 Vattenbalansberäkningar

Vattenbalansberäkningarna som konstruerats i arbetet korrelerade till 48–90 % ($r = 0,48–0,9$) med markvattenmätningarnas information om förändringen av markvattenförråd. Till övervägande del var dock korrelationskoefficienterna jämnt spridda mellan 0,7 och 0,9 för behandlingarna i försöken, vilket talar för beräkningarnas tillförlitlighet. Förutom det utstickande försöksåret 2020 på Öland korrelerade beräkningarna aldrig sämre än till 73 % med mätningarna. Den genomsnittliga korrelationen uppgick till 81 % i de gotländska försöken och 78 % i det öländska. Metodmässigt skiljs förfarandet för år 2020 på Öland från de andra försöksåren genom att förrådet av växttillgängligt vatten (TAW) inte fastställdes genom analys av vattenhållande förmåga, vilket ses som en felkälla. Låg nederbörd under föregående vinter kan ha gjort antagandet att markens vattenförråd är fullt på våren felaktigt, men den risken gäller lika för samtliga försöksår. En annan faktor som kan ha bidragit till att försämra r -värdena för L1-267 på Öland är att fyrskördesystemet, som var unikt för det försöksåret, ställde krav på kortare intervaller mellan faserna i grödkoefficient-kurvan. Den anpassade grödkoefficient-kurvan för L1-267 på Öland kan ha gett för hög eller låg ET_c mellan skördarna och således gett ett lägre r -värde. Ett något felaktigt värde för grödfaktorn K_c lär dock ha mindre effekt på korrelationskoefficienten än ett felaktigt registrerat nederbördstillfälle.

Mellan två mätdatum avvek beräkningarna i en behandling genomsnittligt med mellan 4,1 och 16 mm från mätsvaren från ett mätdatum till ett nästa, vilket är vad måttet MBE berättar. Genomsnittet för de alla tre försöksserierna blev 6,3 mm på Gotland och 10,4 på Öland. Den högre avvikelser på Öland förklaras återigen av det första försöksåret. Under 2021 däremot uppgick den genomsnittliga avvikelser till ca 8 mm på Öland. Beräkningarna överskattar oftare förändringen i markvattenförråd än tvärtom, men marginalen är liten. På Gotland överskattade

beräkningarna markvattenförrådets förändring i 64 % av fallen i genomsnitt, motsvarande siffra för de öländska försöken är 53,4 % – mycket nära en helt jämn fördelning. Beräkningarna över- och underskattar förändringar i markvattenförråd med lika stor mängd vatten, vilket upptäcks om MBE beräknas utan att varje enskild differens mellan uppmätt och beräknad förändring görs positiv. Då jämnas värdet för MBE ut till ett positivt tal mycket nära noll i samtliga behandlingar. Sammantaget går det således inte att dra slutsatsen att beräkningsmodellen systematiskt överskattar förändringen i markvattenförråd. Resultaten motsäger därvidlag de från Allen et al. (1998) och Bao et al. (2021).

5.2 Mätningar av markvatteninnehåll

Mätningarna sammanställdes tidigt i databehandlingsprocessen och hanterades försöksårsvis. Mätvärdenas samstämmighet inom behandlingar varierar på flera sätt i samtliga försök. Dels kan absolutvärdena vara större i vissa upprepningar (rutor) av en behandling än andra – vilket skulle kunna antyda annan jordart. Dels kan förändringen i vattenförråd från ett mättillfälle till nästa skilja, ibland på ett närmast disparat sätt ex. Gotland 2021 L1 269 där rören 4, 6, 11 och 13 i behandling 2 visar på en förändring av: -13 mm, + 16 mm, -12 mm, och +10 mm mellan 2021-06-10 och 2021-06-16. Vid nästa mätning syntes ingen liknande trend, d.v.s. att rör 4 och 11 respektive 6 och 13 skulle visa parvis liknande värden. Vid andra tillfällen kan mätningar visa värden som antyder att väder- eller bevattningsdata är fel. Ett typexempel skulle vara när samtliga mätrör i en behandling visar på en ökning i vattenhalt som bara skulle kunna härröra från ett regn eller bevattningstillfälle, men där ett sådant regn- eller bevattningstillfälle antingen helt saknas i försöksbeskrivningen eller skulle infalla först ett dygn senare. Vid ytterligare andra tillfällen visar mätningarna på orimliga förändringar, så som är fallet i Gotland 2021 L1 268 2021-07-30 då vattenförrådet ska ha minskat med 12–24 mm på tre dagar. Under de tre dagarna var temperaturen förvisso hög men vädret var mulet, vinden mycket svag och det tillkom dessutom något regn, varför det verkar osannolikt med en minskning av vattenförrådet med 12–24 mm. Enligt vattenbalansberäkningarna ska minskningen för samma tre dagar uppgå till knappt 5 mm. Vid mätningen tre dagar innan 2021-07-30 var mätningarna och beräkningarna ense om vattentillståndet i marken (ca 80 mm under $\theta_{\text{Fältkapacitet}}$) vilket gör felaktiga tidigare mätsvar osannolika som förklaring.

I samtliga försöksår har vissa mätningar undantagits före analys då mätresultaten varit ofullständiga. Att undanta fullständiga mätdata har dock i det längsta undvikits i det här arbetet då enskilda mätrörs ”fel” inte är konsekventa. Tvärtom verkar alla mätrör ge märkliga värden någon gång under en säsong. Det är när dessa ”fel” sammanfaller och det inte syns finnas någon uppenbar förklaring som det blir svårt att på ett rättvist sätt välja vilka mätdata som ska användas. Vid dessa tillfällen har

samtliga mätdata använts, vilket gett sämre överensstämmelse mellan uppmätt och beräknad förändring av vattenförråd för de perioderna. Undantag har gjorts vid tre tillfällen, då värden från ett enskilt rör i en behandling uppenbart sticker ut från de andra och då senare mätningar från samma rör gett ofullständiga data, vilket tagits som en indikation på att mätröret kan ha tagit in vatten. Ett exempel är mätrör nr. 7 i behandling 4, Öland 2021 L1 268 som visade en ökning på +60 mm när de andra rören i behandling 4 visade på en ökning med 20–30 mm mellan 2021-06-28 och 2021-07-02. Ett ytterligare exempel är på Öland 2020 L1-267 i behandling 2 där de fyra rören visar på -4, +4, -2 respektive +120 mm mellan 6/7 och 21/7.

Baserat på att mätningarnas tillförlitlighet synes variera slumpmässigt dras slutsatsen att mätningar behöver göras ofta och i stor skala om de ska användas för bevattningsplanering.

5.3 Jämförelser av mätdata och vattenbalans

Statistiskt syns ingen trend att det skulle vara vare sig bättre eller sämre överensstämmelse mellan bevattnade och obevattnade behandlingar, ej heller inom de bevattnade behandlingarna finns några tydliga trender. Skillnaderna i r-värde är störst mellan försöksår snarare än mellan behandlingar, vilket antyder att vattenbalansberäkningarnas lämplighet som planeringsverktyg för bevattning inte skiljer sig mellan bevattningsstrategier som testats i arbetet.

En grafisk detalj som talar för vattenbalansberäkningarnas tillförlitlighet är att trots att differenser mellan uppmätt och beräknad förändring i markvattenförråd uppstår så följer kurvorna för uppmätt respektive beräknad förändring varandra relativt väl riktningsmässigt, särskilt i de bevattnade leden. Tydligast syns detta i försöket L1-267 på Gotland.

Som påpekats i avsnitten 2 och 3.1 tar vattenbalansberäkningar med Penman Monteith-ekvationen ingen hänsyn till kapillär upp- eller nedtransport av vatten mellan olika djupskikt i marken. Om kapillär vattentransport i matjorden vore huvudkällan till differenser mellan mätningar och beräkningar borde differenser vara vanligare nära skörd, då grödans vattenupptag är som störst och grödan hunnit tömma skikten med högst rottäthet på vatten. Någon sådan trend syns inte i resultaten. Att beräkningarna inte hanterar transport av vatten mellan skikt i matjorden innebär också att infiltration förenklats. I vattenbalansberäkningarna antas allt vatten som tillkommit under ett dygn genom nederbörd eller bevattning vara tillgängligt för upptag dygnet efter. En förenklad hantering av infiltration skulle, om avgörande, innebära större differenser vid nederbörds- eller bevattningstillfällen. Differenser som uppträder i samband med nederbörds- och bevattningstillfällen skulle också kunna bero på felaktiga väderdata respektive inrapportering i försöksbeskrivningen. För försöksåret 2020 på Öland (L1-267) förefaller särskilt felaktiga väderdata vara en trolig förklaring då väderstationen låg

längre bort från fältet än under 2021. Vissa differenser i L1-267 på Öland förekommer direkt efter ett bevattningstillfällen vilket antyder felaktig inrapportering. Andra försöksår har överensstämelsen tvärtom varit som bäst direkt efter ett bevattningstillfälle. Grafiskt förefaller också felaktiga väderdata som en sannolik felkälla, då differensen mellan uppmätt och beräknad förändring var som högst i augusti då mest nederbörd föll. Dock tenderade även de båda försöken på Gotland 2021 att visa stor differens mellan uppmätt och beräknad förändring i markvattenförråd i augusti, trots att korrelationen blev god i de försöken som helhet.

Vattenbalansberäkningarna som används i arbetet kräver liten kännedom om markens hydrauliska egenskaper, den information om marken som behövs är innehållet av växttillgängligt vatten vid fältkapacitet (TAW). Under databehandlingen föreföll parametern TAW närmast självreglerande i efterhand. Om TAW höjdes eller sänktes i någon färdigställd vattenbalansberäkning blev överensstämelsen mellan beräknad och uppmätt förändring i vatteninnehåll för hela det aktuella försöksåret omedelbart sämre, både grafiskt och mätt i korrelationskoefficient. Stämmer förhållandet skulle alltså mätningar och vattenbalansberäkningar av den typ som använts i arbetet kunna fungera som inkänningsmetod för en jords förråd av växttillgängligt vatten, om metoden ska praktiseras på en jord där TAW är okänd.

6. Slutsatser och rekommendationer

Sammanfattningsvis har vattenbalansberäkningar i arbetet befunnits fungera väl och metoden kan rekommenderas för bevattningsplanering. Med rätt indata kunde vattenbalansberäkningarna beskriva förändringen i markvattenförråd med 73–93 % överensstämmelse ($r = 0,73-0,93$) med vattenhaltsmätningarna, med 6–8 mm genomsnittlig felmarginal mellan två mättillfällen och utan att konsekvent överskatta eller underskatta storleken på förändringarna i markvattenförråd. Metoden ställer dock krav på tillgång till väderdata som inte alla vädertjänster tillhandahåller. Med ökat avstånd till lämplig väderstation, sämre kunskap om markens vattenhållande förmåga och ett annat skördesystem blev beräkningarnas överensstämmelse med mätningarna märkbart sämre. Ökar avståndet till väderstationen framstår andra ingångsvärden, såsom analys av den tilltänkta jordens vattenhållande förmåga vid olika bindningstryck, som viktigare för beräkningarnas tillförlitlighet än om avståndet är kort. Detta för att begränsa antalet felkällor. Kan metoden testas ett år på det aktuella fältet skulle dock kravet på jordanalys minska, då man med det föreliggande arbetets analysmetod verkar kunna experimentera sig fram till ungefärligen rätt TAW med hjälp av korrelationskoefficienten, om andra felkällors påverkan är liten.

Anpassning av grödkoefficient-kurvor behöver göras varje år och riskerar bli föremål för godtycklighet, en enhetlig metod med tydliga föreskrifter för vilka K_c -faser som bör förkortas eller förlängas vid anpassning till skördedatum hade möjligen underlättat standardiserad användning av vattenbalansberäkningarna. Sammantaget bedöms dock felaktiga nederbördsdata ha större inverkan på överensstämmelsen mellan beräknad och uppmätt förändring än felaktiga K_c -värden.

Markvattenhaltsmätare rekommenderas som komplement till vattenbalansberäkningar. I ett fall där lokal nederbörd inte registreras av väderstationen skulle mätningar av markvattenhalten, alternativt noga övervakade regnmätare, vara nödvändiga komplement till vattenbalansberäkningarna. Att däremot förlita sig enbart på få mätningar av markens volymetriska vattenhalt som grund för bevattningsplanering framstår i detta arbete inte som tillrädligt om det finns tillgång till rätt väderdata.

Referenser

- Ahmadi, S.H., Sepaskhah, A.R. & Zarei, M. (2020). Modeling winter barley root distribution in flat and raised bed planting systems subject to full, deficit and rainfed irrigation. *Rhizosphere*, 16, 100257. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100257>
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. & Smith, M. (1998). *Water for Sustainable Food and Agriculture Water Sustainable and Agriculture, A report produced from the G20 Presidency of Germany*. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56). Rom.
- Andersson, S. (1972). Markfysikaliska undersökningar i odlad jord XXIII. *Grundförbättring*, 25 (2–3), 53–143
- Andås, C. & Nygårds, J. (2021). *Slutrapport: Bevattning av vall*. Jomala, Åland: Ålands Hushållningssällskap. Ej publ.
- Bao, Y., Liu, T., Duan, L., Tong, X., Zhang, L., Singh, V.P., Lei, H. & Wang, G. (2021). Comparison of an improved Penman-Monteith model and SWH model for estimating evapotranspiration in a meadow wetland in a semiarid region. *Science of The Total Environment*, 795, 148736. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148736>
- Berglund, G., Eriksson, J., Berglund, K. & Karlsson, S.-E. (1982). *Resultat av 1981 års fältförsök avseende täckdikning, övrig grundförbättring och bevattning*. (82:1). Uppsala. <https://pub.epsilon.slu.se/5154/> [2021-10-13]
- Berglund, G., Eriksson, J., Berglund, K., Karlsson, S.-E. & Gustafsson, E.-L. (1984). *Resultat av 1983 års fältförsök avseende täckdikning, övrig grundförbättring och bevattning*. (84:1). Uppsala. <https://pub.epsilon.slu.se/5151/> [2021-10-13]
- Berglund, G., Eriksson, J. & Karlsson, S.-E. (1983). *Resultat av 1982 års fältförsök avseende täckdikning, övrig grundförbättring och bevattning*. (83:1). Uppsala. <https://pub.epsilon.slu.se/5153/> [2021-10-13]
- Bergström, S. (1993). *Sveriges hydrologi - grundläggande hydrologiska förhållanden*. SMHI.
- Berti, A., Tardivo, G., Chiaudani, A., Rech, F. & Borin, M. (2014). Assessing reference evapotranspiration by the Hargreaves method in north-eastern Italy. *Agricultural Water Management*, 140, 20–25. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.03.015>
- Dane, J.H., Walker, R.H., Bahaminyakamwe, L. & Belcher, J.L. (2006). Tall fescue and hybrid bluegrass response to soil water matric head limits. *Agricultural Water Management*, 86 (1), 177–186. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.07.001>
- Devices, D.T. (2016). *User Manual for the SDI-12 Profile Probe Type SDI PR2/4 and SDI PR2/6*. Cambridge: Delta-T Devices Ltd.
- Eckersten, H., Gärdenäs, A. & Lewan, E. (2004). Vattentransport i markväxt-atmosfär. *Biogeofysik - en introduktion*. Uppsala: Emergo 2004:3 x-y
- Feng, L., Kristensen, E.F., Moset, V., Ward, A.J. & Møller, H.B. (2018). Ensiling of tall fescue for biogas production: Effect of storage time, additives and

- mechanical pretreatment. *Energy for Sustainable Development*, 47, 143–148. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2018.10.001>
- Fogelfors, H. (2015). *Vår mat: odling av åker- och trädgårdsgrödor*. 1. uppl. Lund: Studentlitteratur.
- Freire, A.G., Alencar, T.L. de, Chaves, A.F., Nascimento, Í.V. do, Assis, R.N. de, van Lier, Q. de J. & Mota, J.C.A. (2018). Comparison of devices for measuring soil matric potential and effects on soil hydraulic functions and related parameters. *Agricultural Water Management*, 209, 134–141. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.07.008>
- Försöksavdelningen (1969). *Resultat av 1968 års täckdikningsförsök och bevattningsförsök*. (40). Uppsala. <https://pub.epsilon.slu.se/5728/> [2021-10-13]
- Gassmann, M., Gardiol, J. & Serio, L. (2011). Performance evaluation of evapotranspiration estimations in a model of soil water balance. *Meteorological Applications*, 18 (2), 211–222. <https://doi.org/10.1002/met.231>
- Grusson, Y., Wesström, I. & Joel, A. (2021). Impact of climate change on Swedish agriculture: Growing season rain deficit and irrigation need. *Agricultural Water Management*, 251, 106858. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106858>
- Gurara, M.A., Jilo, N.B. & Tolche, A.D. (2021). Impact of climate change on potential evapotranspiration and crop water requirement in Upper Wabe Bridge watershed, Wabe Shebele River Basin, Ethiopia. *Journal of African Earth Sciences*, 180, 104223. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104223>
- Hillel, D. (1980). *Fundamentals of soil physics*. New York: Academic Press.
- Holmberg, M. (2022). Höga priser på allt ger ett tillfälle att gasa. *Jordbruksaktuellt*. <https://www.ja.se/artikel/2229942/hga-priser-p-allt-ger-ett-tillfille-att-gasa.html> [2022-04-09]
- Håkansson, A., Berglund, G., Eriksson, J. & Johansson, W. (1970). *Resultat av 1969 års täckdikningsförsök och bevattningsförsök*. (45). Uppsala. <https://pub.epsilon.slu.se/5796/> [2021-10-13]
- Håkansson, A., Berglund, G., Eriksson, J. & Johansson, W. (1971). *Resultat av 1970 års täckdikningsförsök och bevattningsförsök*. (47). Uppsala. <https://pub.epsilon.slu.se/5798/> [2021-10-13]
- Håkansson, A., Johansson, W., Berglund, G. & Eriksson, J. (1972). *Resultat av 1971 års täckdiknings-, bevattnings- och kalkningsförsök*. (51). Uppsala. <https://pub.epsilon.slu.se/5763/> [2021-10-13]
- Håkansson, A., Johansson, W., Berglund, G., Eriksson, J. & Linnér, H. (1973). *Resultat av 1972 års täckdiknings-, bevattnings- och kalkningsförsök*. (62). Uppsala. <https://pub.epsilon.slu.se/5712/> [2021-10-13]
- IAEA (2008). *Field Estimation of Soil Water Content*. (30). Wien. <https://www.iaea.org/publications/7801/field-estimation-of-soil-water-content>
- Joel, A. (2018). Grödans vattenbehov och bevattning. Föreläsning, Uppsala. [2022-04-18]
- Joel, A., Nilsson-Linde, N. & Wesström, I. (2020). Går det att höja vallskördarna med enstaka bevattningsgivor - vad händer med kvaliteten? *Försöksrapport Sverigeförsöken 2020*. Hushållningssällskapet, 20–26. sverigeforsoken.se
- Joel, A., Nilsson-Linde, N. & Wesström, I. (2021). Bevattning i vall. *Försöksrapport Sverigeförsöken 2020*. Hushållningssällskapet, 21–27
- Johansson, W. & Linnér, H. (1977). *Bevattning Behov - Effekter - Teknik*. Borås: LTs Förlag.
- Karlsson, L., Persson, A.-T. & Älmefur, M. (2022). Full gas i vallen - trots dyrt kväve. *Arvensis*. 30–31

- Klimatindikator - vegetationsperiodens längd* | SMHI (2022). SMHI. <https://www.smhi.se/klimat/klimatet-da-och-nu/klimatindikatorer/klimatindikator-vegetationsperiodens-langd-1.7887> [2022-05-16]
- Larsson, Å. (2020). *Tillskottsbevattning i vårsäd*. [Avancerad nivå, A2E]. <https://stud.epsilon.slu.se/16688/> [2021-05-27]
- Linnér, H. (2009). Hur kan vi hushålla bäst med våra vattenresurser? Föreläsning, Uppsala. <https://docplayer.se/10414927-Disposition-hur-kan-vi-hushalla-bast-med-vara-vattenresurser-2009-10-07-markavvattning-bevattning-vattentillgang-bevattning-vattenhushallning.html> [2022-04-18]
- Linnér, H., Persson, R., Berglund, K. & Karlsson, S.-E. (1989). *Resultat av 1988 års fältförsök avseende detaljavvattning, markvård och markförbättring samt bevattning*. (89:1). Uppsala. <https://pub.epsilon.slu.se/5123/> [2021-10-13]
- Linnér, H., Persson, R., Berglund, K. & Karlsson, S.-E. (1990). *Resultat av 1989 års fältförsök avseende detaljavvattning, markvård och markförbättring samt bevattning*. (90:1). Uppsala. https://doi.org/10.1/linner_et al_100720.pdf
- Linnér, H., Persson, R., Berglund, K., Karlsson, S.-E. & Gustafsson, E.-L. (1985). *Resultat av 1984 års fältförsök avseende täckdikning, övrig grundförbättring och bevattning*. (85:1). Uppsala. <https://pub.epsilon.slu.se/5149/> [2021-10-13]
- Linnér, H., Persson, R., Berglund, K., Karlsson, S.-E. & Gustafsson, E.-L. (1987). *Resultat av 1986 års fältförsök avseende täckdikning, övrig grundförbättring och bevattning*. (87:1). Uppsala. <https://pub.epsilon.slu.se/5133/> [2021-10-13]
- Linnér, H., Persson, R., Berglund, K., Karlsson, S.-E. & Gustafsson, E.-L. (1988). *Resultat av 1987 års fältförsök avseende täckdikning, övrig grundförbättring och bevattning*. (88:1). Uppsala. <https://pub.epsilon.slu.se/5128/> [2021-10-13]
- LRF (2022). *Kostnadskrisen: Var fjärde lantbrukare minskar sin verksamhet - LRF. Lantbrukarnas Riksförbund*. <https://www.lrf.se/mitt-lrf/nyheter/riks/2022/01/kostnadskrisen-var-fjarde-lantbrukare-minskar-sin-verksamhet/> [2022-04-09]
- Messing, I. (2013). *Markfysikens grunder*. Uppsala: Institutionen för mark och miljö.
- Neuman, L. & Sörkvist, L. (2020). *Fältmaskiner i lantbruket - från bearbetning till skörd*. 1. uppl. Ulricehamn: L & L Förlag.
- Nilsson, T. (2022). Höga priser ger bra odlingskalkyl trots kostnadskris. *ATL*. <https://www.atl.nu/hoga-priser-ger-bra-odlingskalkyl-trots-kostnadskris> [2022-04-09]
- Pramanik, M., Khanna, M., Singh, M., Singh, D.K., Sudhishri, S., Bhatia, A. & Ranjan, R. (2022). Automation of soil moisture sensor-based basin irrigation system. *Smart Agricultural Technology*, 2, 100032. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2021.100032>
- Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Tignor, M., Poloczanska, E.S., Mintenbeck, K., Alegría, A., Craig, M., Langsdorf, S., Löschke, S., Möller, V., Okem, A. & Rama, B. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability - Technical Summary*. (WGII, AR 6). Cambridge University Press: IPCC.
- Regeringskansliet (2016). Att förändra vår värld: Agenda 2030 för hållbar utveckling.
- Soil Scout FAQ* (2020). <https://soilscout.com/faq> [2022-04-18]
- SoilSense - Scientifically-validated sensors* (u.å.). <https://soilsense.io/sensors-en> [2022-04-18]

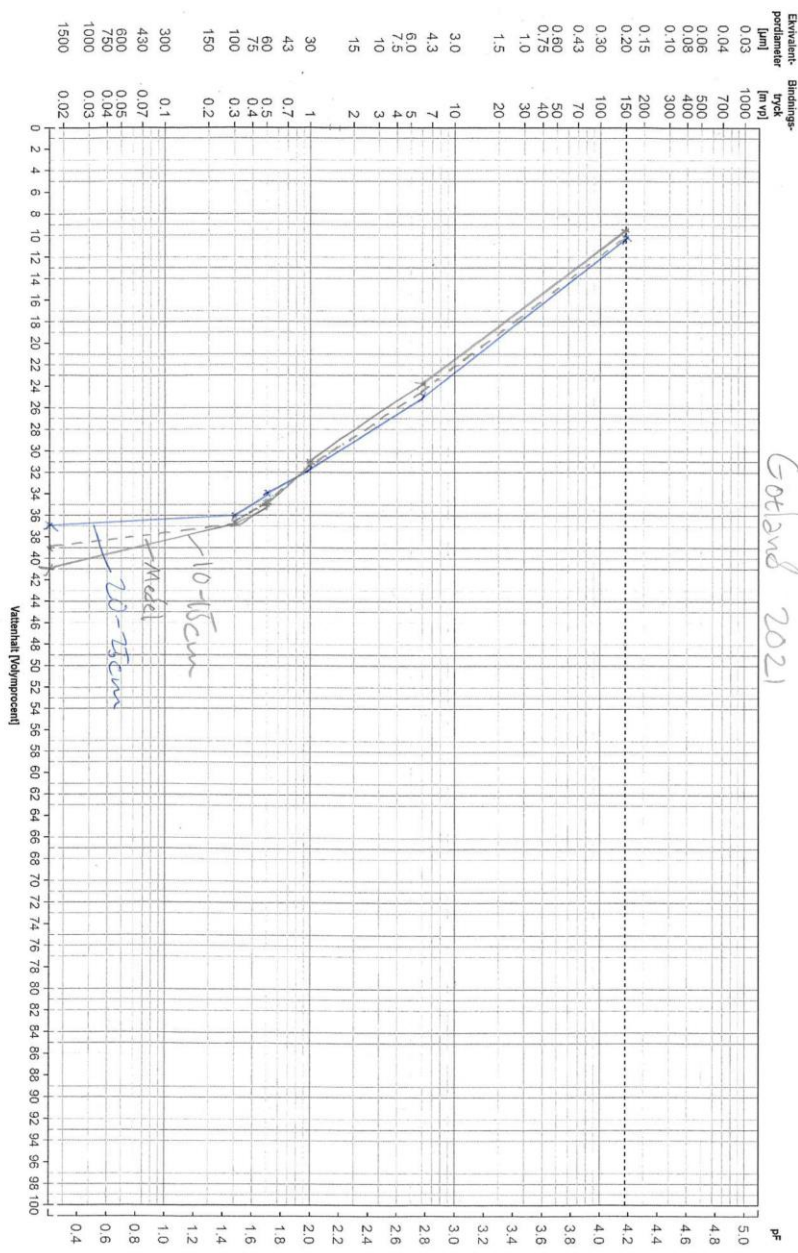
- Thor, G. (2020). *Bevattning i vallodling*. (Grundnivå G2E). SLU. <https://stud.epsilon.slu.se/15633/> [2022-04-09]
- Vishwakarma, D.K., Pandey, K., Kaur, A., Kushwaha, N.L., Kumar, R., Ali, R., Elbeltagi, A. & Kuriqi, A. (2022). Methods to estimate evapotranspiration in humid and subtropical climate conditions. *Agricultural Water Management*, 261, 107378. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107378>
- Weidow, B. (2000). *Växtodlingens grunder*. 2. uppl. Stockholm: Natur och kultur/LT.

Muntliga källor

- ¹ Abraham Joel, docent, SLU, handledningsmöte 2022-03-25

Bilaga 1

pF-kurva för jorden på Hallfreda, Gotland 2021



Bilaga 2

pF-kurva för jorden på Torslunda, Öland 2021

